

科尔沁沙地参考作物蒸散发估算及影响因子分析

李霞¹, 刘廷玺^{1,2}, 段利民^{1,2}, 王冠丽^{1,2}, 周亚军¹

(1.内蒙古农业大学 水利与土木建筑工程学院, 呼和浩特 010018;

2.内蒙古农业大学 内蒙古自治区水资源保护与利用重点实验室, 呼和浩特 010018)

摘要:为了准确评估区域气候干湿状况以及保护半干旱区生态环境,基于科尔沁地区草甸地、半流动沙丘、半固定沙丘、水稻地及玉米地 5 个典型景观类型 2015—2018 年日气象资料,通过 FAO56 Penman-Monteith 公式计算参考作物蒸散发(ET_0),了解不同时间尺度上 ET_0 变化特征,并利用通径分析与指标敏感性分析相结合剖析了 ET_0 的驱动因素。结果表明:(1) 4 年的年平均 ET_0 为 1 051 mm,不同样地 ET_0 年值在 922~1 257 mm 波动,最大值出现在 2017 年;(2) ET_0 季节变化表现为夏季>春季>秋季>冬季;(3) ET_0 月际变化呈抛物线型,3—10 月贡献最大,占全年 ET_0 的 80% 以上;(4) 通径分析中,气象因子对 ET_0 的通径系数表现为 $VPD>R_n>u_2>T_{max}$,直接作用系数最大为 0.614,即 VPD 是影响 ET_0 最重要的因子; T_{max} 对 ET_0 的间接作用最大,间接作用系数为 0.936,且主要通过 VPD 路径对 ET_0 产生作用,间接作用系数为 0.554;指标敏感性分析中,去除 VPD 后 E 由 0.993 减小为 0.877,进一步说明 ET_0 对 VPD 的变化最为敏感。总体而言,VPD 为科尔沁沙地参考作物蒸散发变化的主导因子。

关键词:参考作物蒸散量; Penman-Monteith 模型; 通径分析; 科尔沁沙地

中图分类号:P426.2

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2020)06-0153-07

Estimation of Reference Crop Evapotranspiration and Analysis of Impact Factors in Horqin Sandy Land

LI Xia¹, LIU Tingxi^{1,2}, DUAN Limin^{1,2}, WANG Guanli^{1,2}, ZHOU Yajun¹

(1. Water Conservancy and Civil Engineering College, Inner Mongolia Agricultural

University, Hohhot 010018, China; 2. Inner Mongolia Key Laboratory of Water Resource

Protection and Utilization, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010018, China)

Abstract: In order to accurately assess the regional climate condition and protect the ecological environment in semi-arid areas, based on the daily meteorological data of five typical landscape types including meadow land, semi-mobile sand dune, semi-fixed sand dune, rice and maize land from 2015 to 2018 in Horqin area, reference crop evapotranspiration (ET_0) was calculated by using FAO56 Penman-Monteith model. Changes in ET_0 on different time scales was analyzed, and then causes of ET_0 changes were analyzed through path analysis and index sensitivity analysis. The results showed that: (1) the 4-year average ET_0 was 1 051 mm, the annual value of ET_0 fluctuated between 922 mm and 1 257 mm at different sample plots, and the maximum value appeared in 2017; (2) the seasonal change of ET_0 decreased in the order: summer>spring>autumn>winter; (3) inter-monthly changes of ET_0 were parabolic, with the largest contribution from March to October and accounting for more than 80% of ET_0 in the whole year; (4) In path analysis, the path coefficients of meteorological factors to ET_0 decreased in the order: $VPD>R_n>u_2>T_{max}$, and the maximum direct action coefficient was 0.614, indicating that VPD was the most important factor to affecting ET_0 , T_{max} had the largest indirect effect on ET_0 , and the indirect action coefficient was 0.936, and it mainly affected ET_0 through VPD path, and the indirect action coefficient was 0.554; in the index sensitivity analysis, E decreased from 0.993 to 0.877 after removing VPD, which further indicated that ET_0 was the most sensitive

收稿日期:2020-01-20

修回日期:2020-02-28

资助项目:国家自然科学基金(51620105003,51139002,51869017,51669017);内蒙古自然科学基金重点项目(2018ZD05);教育部创新团队发展计划(IRT_17R60)、科技部重点领域科技创新团队(2015RA4013)、内蒙古自治区草原英才产业创新创业人才团队、内蒙古农业大学寒旱区水资源利用创新团队(NDTD2010-6);内蒙古自治区高等学校“青年科技英才支持计划”(NJYT-18-B11)

第一作者:李霞(1994—),女,内蒙古乌海人,硕士,研究方向为寒旱区蒸散发。E-mail:2929306405@qq.com

通信作者:刘廷玺(1966—),男,内蒙古赤峰人,教授,主要从事干旱区生态水文研究。E-mail:txliu1966@163.com

to the change of VPD. In general, VPD was the main factor for evapotranspiration in Horqin sandy land.

Keywords:reference crop evapotranspiration; Penman-Monteith model; path analysis; Horqin sandy land

全球气候随着社会经济的发展发生着巨大改变,水资源合理、高效的利用成为众多学者关注的焦点^[1]。参考作物蒸散发(Reference Crop Evapotranspiration, ET_0)表征某一区域水分供应不受限制时可能达到的最大蒸发量^[2],能真实反映气象因素对蒸散量的影响,是评价某一地区干湿状况、植被耗水量的重要指标^[3-4]。因此,量化评价气象要素对 ET_0 的影响,评估 ET_0 对不同气象因子变化的敏感性,有利于探明水文循环对气候变化的响应程度^[5]。

目前 ET_0 的确定方式主要包括实际测定法和模型估算法,仪器测定工作量大且成本较高,具有一定的局限性,难以推广。而针对不同地区的 ET_0 估算模型均得到较好的验证^[6],其中,1998 年由联合国粮农组织(FAO)^[7]推荐的 Penman-Monteith 模型综合了各种气象因素的影响,具有良好的水文气象物理基础^[8],在干旱或湿润等气候条件差异较大地区均被证实是一种相对准确的方法,在世界各地得到了广泛的应用^[9-11]。国内外众多学者均以 FAO56 P-M 模型作为标准方法,对其他估算模型的原始经验系数进行修正及适用性评价^[12-15]。近年来,针对参考作物蒸散发的驱动机制及其影响因素的研究受到学术界的广泛关注^[16-19],以往研究多基于多元线性回归分析、相关性分析等方法,只能简单识别影响参考作物蒸散发的因子,通径分析方法可以定量分析影响参考作物蒸散发的直接和间接影响因子,全面讨论各影响因子的作用与程度。

科尔沁沙地面积约 5.06 万 km^2 ,是我国典型的干旱半干旱荒漠化地区,生态环境脆弱^[20],本文基于 FAO56 P-M 模型对科尔沁沙地典型地区 ET_0 进行估算,对比不同土地利用类型下、不同时间尺度 ET_0 变化特征,利用通径分析对科尔沁典型地区参考作物蒸散发影响因素进行系统分析,识别影响参考作物蒸散发变化的主导因子,探索气候变化对干旱半干旱地区参考作物蒸散发的影响机理,以期为该地区的生态环境修复提供科学指导,并对开展干旱监测、荒漠化治理和水资源合理利用等相关研究提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于科尔沁沙地东南边缘的阿古拉生态水文试验站($122^{\circ}32'30''$ — $122^{\circ}41'00''E$, $43^{\circ}18'48''$ — $43^{\circ}21'24''N$),见图 1,面积约 55 km^2 ,是典型的半干旱荒漠化地区。地形总趋势为南北高、中间低,分布

有沙丘、草甸、农田等多种地貌。

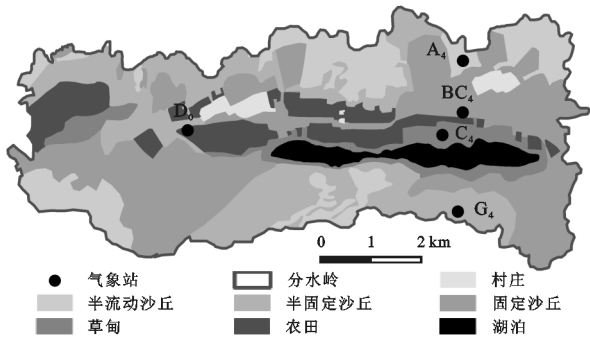


图 1 研究区地理位置及试验点示意图

研究区属半干旱温带大陆性季风气候,多年平均降雨量 389 mm,主要集中在 6—9 月,多年平均气温 $6.6^{\circ}C$,月平均气温在 $-13.4\sim 23.9^{\circ}C$ 波动,多年平均相对湿度 55.8%;主要沙生植被有沙蓬(*Agriophyllum squarrosum*)、差巴嘎蒿(*Artemisia halodeudrou*)、小叶锦鸡儿(*Caragana microphylla*)、少花蒺藜(*Cenchrus pauciflorus*)等,草甸植被有芦苇(*Phragmites australis*)、羊草(*Leymus chinensis*)等,农田主要种植玉米(*Zea mays*)、水稻(*Oryza sativa*)等作物;区内沙丘地带性土壤和非地带性土壤交错分布,地带性土壤为栗钙土,非地带土壤主要有砂壤土。本文所选的不同下垫面类型包括草甸地 C_4 ,半流动沙丘 A_4 ,半固定沙丘 G_4 ,水稻地 D_0 以及玉米地 BC_4 ,具体信息见表 1。

表 1 研究区站点介绍

地貌类型	测站名称	主要植被	东经/(°)	北纬/(°)	高程/m
半流动沙丘	A_4	差巴嘎蒿等	122.6547	43.3493	205
半固定沙丘	G_4	小叶锦鸡儿等	122.6534	43.3219	212
草甸	C_4	牧草	122.6534	43.3363	184
农田	BC_4	玉米	122.6532	43.3268	201
	D_0	水稻	122.5873	43.3365	184

1.2 数据来源

研究区内建有多个梯度环境监测系统,常规气象数据有净辐射、空气温度、空气湿度、风速、降雨量等气象数据。这些数据采集频率为 10 Hz,主要由数据采集器(CR1000, Campbell Scientific)储存并记录每 10 min 的平均值。仪器型号和安装高度见表 2。

1.3 研究方法

1.3.1 P-M 模型

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

式中: ET_0 为参考作物蒸散发(mm/d); Δ 为饱和水汽压—温度曲线斜率($\text{kPa}/^\circ\text{C}$); R_n 为冠层表面净辐射 [$\text{MJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$]; T 为平均气温($^\circ\text{C}$); G 为土壤热通量 [$\text{MJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$]; u_2 为 2 m 高度处风速(m/s); e_s 为饱和水汽压(kPa); e_a 为实际水汽压(kPa); γ 为湿度计常数($\text{kPa}/^\circ\text{C}$)。

表 2 地面监测基本信息

站点	类别	净辐射	风速风向	空时温湿度	降水量	土壤水分、温度、电导率	土壤热通量
A ₄	仪器型号	CNR-LITE	034B	HMP155A	TE525MM	Hydra Probe CS655	HFP01sc
	架高(埋深)/m	4.95	2,3,5	2,5,10	0.7	0.1,0.2,0.4,0.8,1.2	0.1,0.4
G ₄	仪器型号	NR-LITE	034B	HMP155A	TE525MM	Hydra Probe CS655	HFP01
	架高(埋深)/m	2	2	2,3,5	1.9	0.1,0.2,0.4,0.8	0.1
C ₄	仪器型号	CNR-LITE	034B	HMP155A	TE525MM	Hydra Probe CS655	HFP01sc
	架高(埋深)/m	2.7	2,3,5	2,5,10	0.7	0.1,0.2,0.4,0.8,1.2	0.1
BC ₄	仪器型号	NR-LITE2	034B	HMP155A-L	TE525MM	Hydra Probe CS655	HFP01sc
	架高(埋深)/m	3	2,3,5	2	0.7	0.1,0.2,0.4,0.8	0.1
D ₀	仪器型号	NR-LITE2	034B	HMP155A	TE525MM		
	架高(埋深)/m	1.5	2,3,5	2	0.7		

1.3.2 通径分析 1921 年,塞沃尔·赖特首先提出了通径分析的多元统计方法^[21],经过不断改进后可以直观、准确地分析多个自变量与因变量之间的线性关系,定量描述各自变量对因变量的直接和间接重要性,进而研究各变量之间的相互作用关系。由于 ET_0 与多个气象因子存在较强的相关性,且各气象因子间相互影响、相互制约,很难评估 ET_0 对某个气象要素的响应程度,因此利用通径分析在对简单相关系数进行分解的基础上来研究各因素间直接和间接的影响效果,进而对模型中变量的影响程度有深入的理解^[22]。本文利用 SPSS 24.0 软件,分析 ET_0 的直接和间接影响因素,并进一步分析剖析各个自变量之间的相互作用。

2 结果与分析

2.1 参考作物蒸散发变化特征

2.1.1 不同景观类型 ET_0 年际变化特征 选取研究区内具有代表性的景观类型半流动沙丘试验区 A₄,半固定沙丘试验区 G₄,草甸试验区 C₄,玉米试验区 BC₄ 以及水稻试验区 D₀ 为研究对象,将各试验区气象要素输入 FAO56 P-M 模型中估算 ET_0 ,分析其年际变化,结果如图 2 所示(其中半固定沙丘 G₄,玉米 BC₄ 及水稻 D₀ 于 2015 年 5 月份建站)。由图 2 可知草甸试验区 C₄ 的 ET_0 值明显高于其他地貌类型,2015—2018 年总 ET_0 值分别为 1 201,1 255,1 257,1 172 mm;半固定沙丘 G₄ 和玉米地 BC₄ 年 ET_0 值基本一致且保持较低水平,最小值在 2016 年,为 922 mm;半流动沙丘 A₄ 的 ET_0 值最大出现在 2017 年,为 1 072 mm,最小值在 2016 年(1 017 mm);水稻试验区 D₀ 年 ET_0 值在 1 000 mm 左右波动;以各年内 5 个试验区的平均值代表区域 ET_0 的平均水平,可以看出

2015—2018 年区域 ET_0 均值起伏变化较为平缓,分布在 2.708~2.983 mm/d,最大值出现在 2017 年,其余年份较为接近。

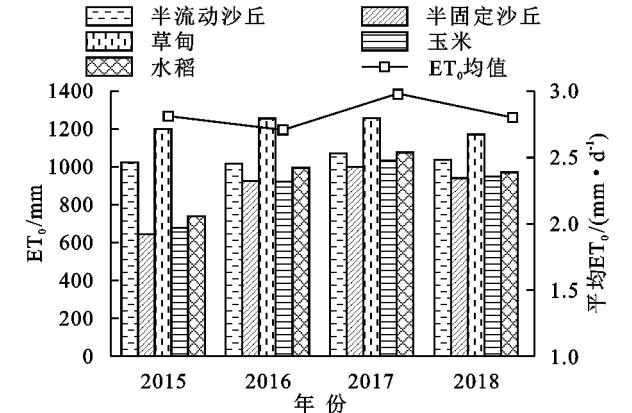


图 2 不同景观类型 ET_0 年值变化

2.1.2 不同景观类型 ET_0 季节变化特征 采用气象学标准划分四季,即春季为 3—5 月,夏季为 6—8 月,秋季为 9—11 月,冬季为 12 月—次年 2 月^[23]。由图 3 可知, ET_0 季节性变化显著,夏季为 ET_0 贡献最大的季节,草甸试验区夏季 ET_0 占全年的 39.44%~48.20%,最大值出现在 2016 年,达 535 mm,最小值出现在 2018 年,为 462 mm,半流动沙丘、半固定沙丘、玉米及水稻试验区夏季 ET_0 均小于草甸试验区,且各试验区间差异较小,均占全年 ET_0 的 36.63% 以上;春季 ET_0 占比仅次于夏季且数值较高,变化范围为 319~448 mm,占全年的 33.98%~37.06%,各年 ET_0 值均表现为草甸试验区最大、半固定沙丘试验区最小;秋季 ET_0 最大值为 245.52 mm,最小值为 137.25 mm,占比为 14.38%~21.33%,草甸试验区略高于其他地貌类型;冬季 ET_0 值最小,各试验区冬季 ET_0 值基本一致,占比均不足 10%,且年际间差异较小;春、夏、秋、冬季 ET_0 均值分别为 390.22,412.78,190.95,66.05 mm。

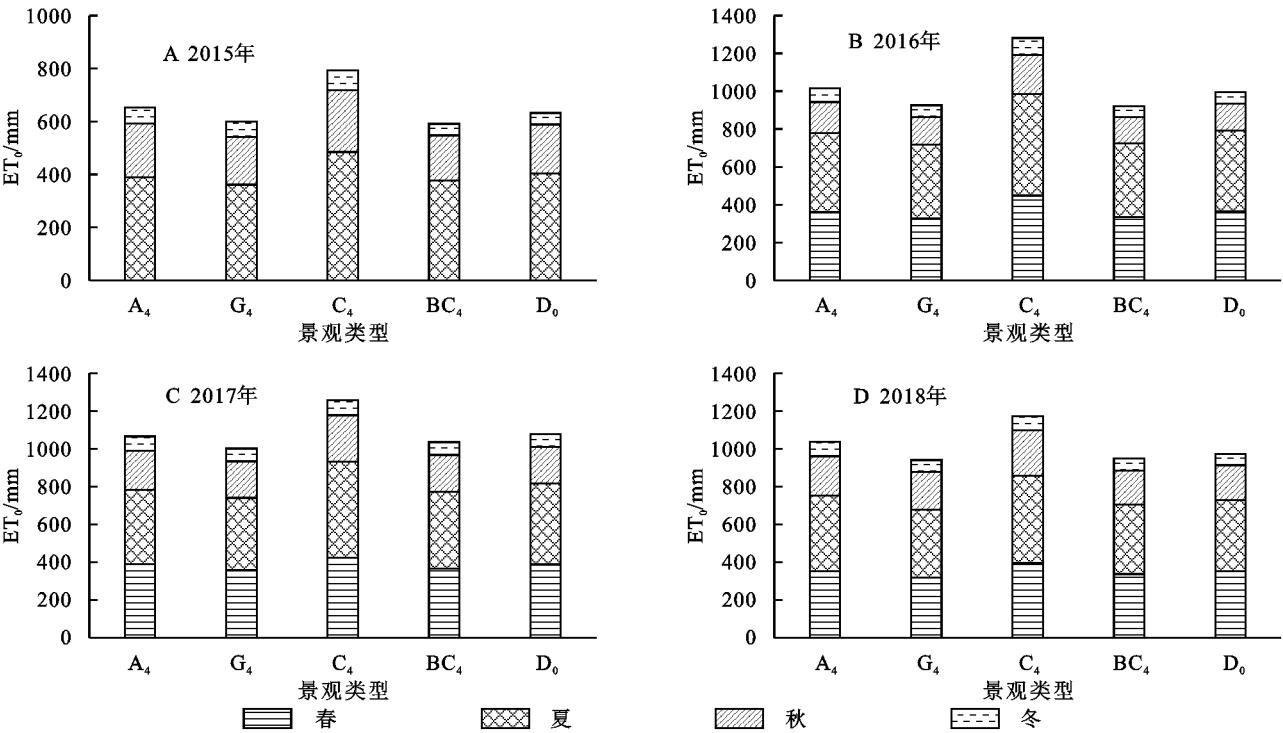


图 3 不同景观类型 ET_0 季节变化

2.1.3 不同景观类型 ET_0 月变化特征 ET_0 多年逐月平均值变化曲线如图 4 所示。不同景观类型 ET_0 月变化趋势大致相同,呈单峰抛物线型,1—5 月逐渐升高,最高值出现在 5 月,达 4.74~6.41 mm/d,6—12 月 ET_0 月均值逐渐降低,最低值出现在 1 月或 12 月,为 0.51~0.73 mm/d;草甸地 C_4 全年高于其他景观类型,1—4 月不同下垫面间 ET_0 值差异较小,4 月份开始不同下垫面间差异逐渐明显,5 月 ET_0 值差异最大,整体表现为草甸试验区 C_4 >水稻试验区 D_0 >半流动沙丘 A_4 >玉米试验区 BC_4 >半固定沙丘 G_4 ,6 月以后各试验区 ET_0 差异逐渐减小。

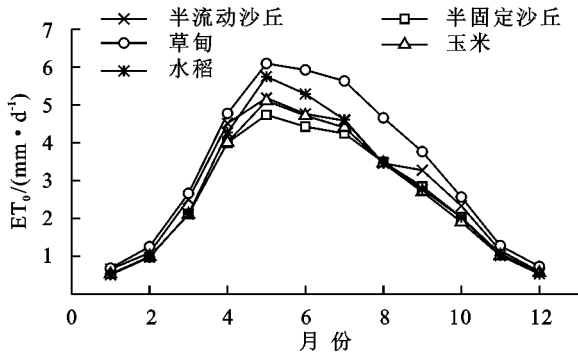


图 4 多年逐月平均 ET_0 变化趋势

2.2 参考作物蒸散量变化成因分析

2.2.1 气象因子变化特征 利用 5 个试验区平均气温 (T_{mean})、最低气温 (T_{min})、最高气温 (T_{max})、净辐射 (R_n)、2 m 处风速 (u_2) 及饱和水汽压差 (VPD) 值进行统计分析,得到 2015—2018 年气象要素月平均值系列,变化

过程见图 5。 T_{mean} 、 T_{min} 和 T_{max} 变化情况大体相同,即 1—7 月逐月递增,7—12 月逐渐减小,整体呈抛物线型,年际间差异较小,多年平均 T_{mean} 为 7.29℃,多年平均 T_{min} 为 1.18℃,多年平均 T_{max} 为 13.46℃; R_n 的变化规律与温度与较高的一致性,年内变化范围为 -0.2~12.14 MJ/(m²·d),最大值出现在夏季,其中 2016 年峰值在 6 月,其余年份在 7 月,最小值出现在冬季; u_2 各年内均表现为春季最高,最大风速可达 4.59 m/s,夏季最低,最低风速为 1.98 m/s; VPD 变化趋势呈单峰曲线状,2015—2017 年最大值在 5 月,分别达 1.26、1.37、1.46 kPa,2018 年最大值出现在 6 月,为 1.32 kPa,2017 年 4—7 月 VPD 值明显高于其他年份,其余月份相差较小。

2.2.2 气象要素对 ET_0 的通路分析 根据通路分析方法对研究区内不同下垫面多年平均逐日 ET_0 和 T_{mean} 、 T_{min} 、 T_{max} 、 R_n 、 u_2 及 VPD 等气象因子进行逐步回归,结果显示 VPD、 R_n 、 u_2 、 T_{max} 对 ET_0 的影响显著 ($p<0.05$), T_{mean} 、 T_{min} 对 ET_0 的影响不显著,将不显著因子剔除后,以 ET_0 为因变量,4 个气象因子为自变量,建立最优的回归方程,分别计算关键因子与 ET_0 的通路系数,确定各因子对 ET_0 的直接效应、间接效应以及相关性,并分析各气象要素对回归可靠程度 (E) 的总贡献,结果见表 3。

由表 3 可知,VPD 对 ET_0 的直接作用 (通路系数) 为 0.614,高于其他因子,说明 VPD 可对 ET_0 产生较大影响, R_n 对 ET_0 的直接作用 (0.423) 在指标中位

列第二位,因此 R_n 也对 ET_0 产生较大作用, u_2 和 T_{\max} 对 ET_0 的直接作用较小, T_{\max} 对 ET_0 表现为负效应,其余因子均表现为正效应;VPD, R_n , u_2 , T_{\max} 对回归方程估测可靠程度 E 的总贡献分别为 0.601, 0.402,0.036,−0.046,进一步说明 VPD 是影响 ET_0 最重要的指标;由各因子间的间接作用可知, T_{\max} 和 R_n 的间接和分别为 0.936,0.527,对 ET_0 的间接影响作用较明显, T_{\max} 主要通过 VPD 路径对 ET_0 产生影响,间接作用系数为 0.554,占其总间接作用系数的 57.53%, R_n 通过 VPD 路径作用于 ET_0 的间接作用系数为 0.564。综合通径分析的结果认为,科尔沁沙地 ET_0

受各气象因子综合作用,主要影响因子为 VPD,其次是 R_n 和 T_{\max} , u_2 对 ET_0 的影响较小, T_{\max} 和 R_n 通过影响其他气象因子间接的对 ET_0 产生作用。

2.2.3 指标敏感性分析 敏感性分析是从多个不确定性要素中逐一找出对 ET_0 有重要作用的敏感要素,并探讨其作用程度。 ET_0 和各气象要素之间关系极为密切,在通径分析过程中去掉某个气象因子后其他气象因子对 ET_0 的直接作用、间接作用及 E 均会发生变化,为进一步计算各气象因子对 ET_0 的敏感性,依次去掉某一气象要素,利用剩余的气象因子对 ET_0 进行通径分析。

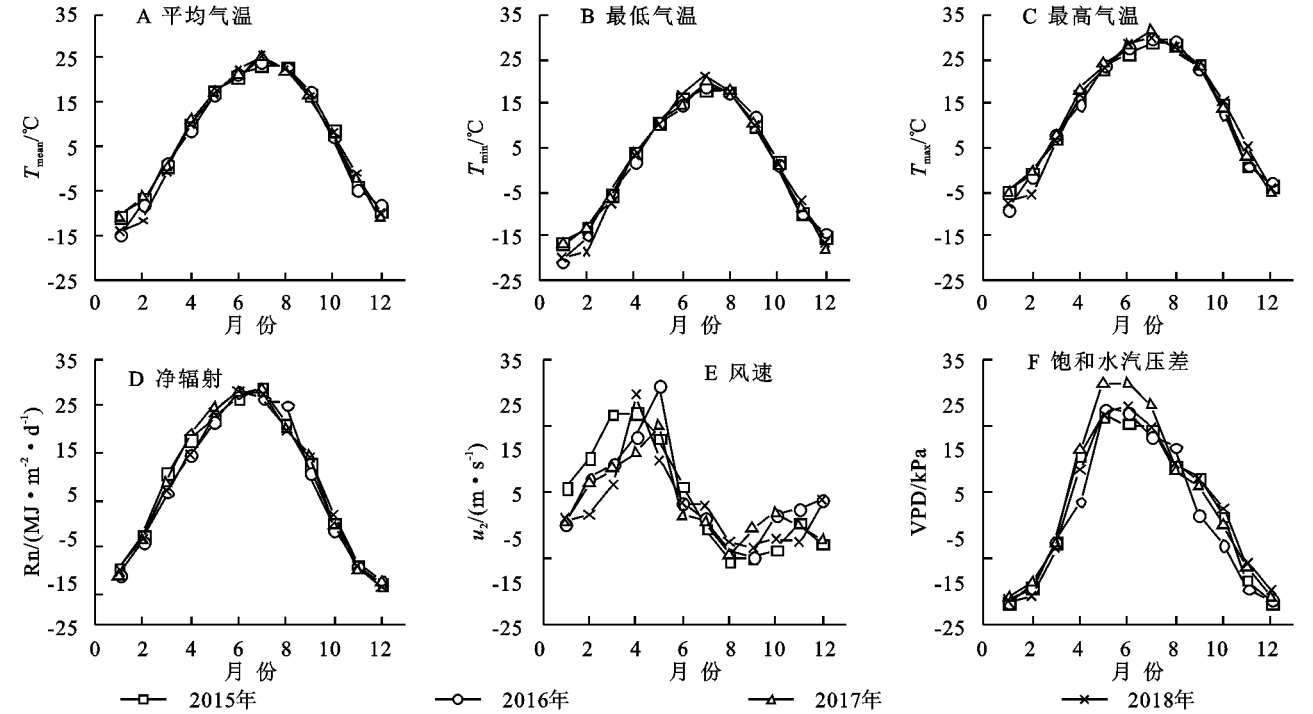


图 5 气象因子变化趋势

表 3 气象因子对 ET_0 的通径分析

气象因子	通径系数	间接作用					相关系数	对 E 的总贡献
		VPD	R_n	u_2	T_{\max}	间接和		
VPD	0.614		0.389	0.023	−0.047	0.364	0.979	0.601
R_n	0.423	0.564		0.011	−0.048	0.527	0.950	0.402
u_2	0.130	0.110	0.036		0.001	0.147	0.276	0.036
T_{\max}	−0.053	0.554	0.384	−0.003		0.936	0.883	−0.046

表 4 逐步减去最不敏感项气象因子对 ET_0 的通径分析

指标数	VPD		R_n		u_2		T_{\max}		E
	直接	间接	直接	间接	直接	间接	直接	间接	
4	0.614	0.364	0.423	0.527	0.130	0.147	−0.053	0.936	0.993
3(VPD)			0.701	0.202	0.221	0.054	0.226	0.587	0.877
3(R_n)	0.840	0.139			0.129	0.148	0.128	0.755	0.971
3(u_2)	0.752	0.226	0.421	0.529			−0.178	1.061	0.979
3(T_{\max})	0.586	0.392	0.401	0.550	0.138	0.139			0.992

注:括号中内容表示去除的气象要素。

由表 4 可知,与 4 个指标的分析结果比较发现,去掉 VPD 后,对 R_n 及 T_{\max} 的直接和间接作用均产

生较大影响;去除 R_n 后,VPD 对 ET_0 的直接作用由 0.614 变为 0.840,间接作用由 0.364 变为 0.139,对 T_{\max} 的直接、间接作用影响也较大;去除 u_2 引起 VPD 和 T_{\max} 的直接、间接作用变化显著;去除 T_{\max} 对各因子的直接、间接作用均无显著影响,各因子的去除并不影响 u_2 的直接、间接作用;在分别去掉 VPD, R_n , u_2 , T_{\min} 后, E 值由 0.993 分别下降为 0.877, 0.971, 0.979, 0.992, 随着方程中自变量数量的减少导致估测可靠程度下降,说明 ET_0 的变化受多种气象因子联合影响,去掉 VPD 后, E 的变化最明显,由此可知 ET_0 对 VPD 的变化最为敏感,其次为 R_n 和 u_2 , 去除 T_{\max} 后 E 的变化极小,说明 ET_0 对 T_{\max} 的变化不敏感。

3 讨论

参考作物蒸散量是区域水分循环和能量平衡研究的重要组成部分,准确地估算 ET_0 不仅是制定地区作物植被需水量方案和水资源优化合理规划决策的重要依据,是评价作物需水量、生产潜力及水资源供需平衡额重要指标。 ET_0 可反映区域气候因素的变化,因此,定量分析 ET_0 对气象因子的响应程度,有利于揭示区域气候条件对生态环境的改变。

ET_0 的变化不仅有气象因子的影响,还有各气象要素之间也存在着相互影响,部分学者对 ET_0 的影响因素进行相关研究。曹永强等^[24] 研究得出日最高气温、日最低气温和日照时数是驱动辽宁省 ET_0 变化的最主要气象要素;Zhao 等^[25] 研究成果显示海河流域 ET_0 对 RH 最敏感,而 u_2 和 R_n 的降低是引起海流域东南部区域 ET_0 下降的主要因素;汪精海等^[26] 认为黑河流域 ET_0 的主要影响因子为 RH,其次为 u_2 和 T 。可见,不同地区 ET_0 的主导因子不同。本研究中,通径分析和指标敏感性分析均显示 VPD 对 ET_0 的影响作用最大,张雪松等^[27] 也得到相似的结论。VPD 为同一温度下饱和水汽压和实际水汽压之差,反映空气的潮湿程度,表征了水汽含量和气温的综合效果,对植物气孔的开闭产生直接影响^[28],进而控制植物蒸腾和光合作用等生理过程,对蒸散过程及结果产生着重要的影响^[29],而 R_n 和 u_2 则通过 VPD 路径实现间接影响并起重要作用。

就年尺度而言,无论是各下垫总 ET_0 值还是研究区内平均 ET_0 值,均在 2017 年达到最大,这是由于 2017 年 VPD 值远高于其他年份,另外 R_n 值也处于较高水平, R_n 作为驱动系统运转的源动力,可改变系统中水热通量分配状况及水相变化过程,进而影响

ET_0 的变化,这与牛忠恩等^[30] 的研究结果一致;季节尺度上, ET_0 平均值为:夏季>春季>秋季>冬季,阿勒泰地区^[31] 也得到了相似的结论,这是由于夏季(6—8月)降水充沛,日照时数长,净辐射增强,水热条件良好,因此 ET_0 值较高;月尺度上, ET_0 最小值出现在 1 月,此时 T_{mean} 为一年的最低值,VPD 和太阳净辐射值也处在全年较低水平,导致参考作物蒸散发驱动能量不足;最大值在 6 月,这是多种气象条件综合作用的结果,这与吴丽萍等^[32] 的研究结果相似;月尺度上不同景观类型在 4 月份之后 ET_0 值差异逐渐增大,这是由于各样地地理位置及植被种类不同,草甸试验区紧邻湖泊且植被覆盖度高,水稻试验区植被长势密集且通过淹灌方式使田格保持一定深度的水层,草甸及水稻试验区的 VPD 值高于其他样地,因此 ET_0 值亦明显高于半流动沙丘、玉米及半固定沙丘;科尔沁沙地是中国北方沙漠化最典型的地区之一,生态环境破坏严重,下垫面均一,主要受区域气候变化和人类活动的影响,定量评价气象因子对该地区 ET_0 的影响程度,可为相关研究提供理论依据。

4 结论

(1) ET_0 年值变化范围为 922~1 257 mm,不同下垫面均在 2017 年达到最大值,季节尺度上有明显的差异性,整体表现为夏季>春季>秋季>冬季,月际变化呈单峰曲线状,最大值出现在 5 月,不同景观类型 ET_0 值表现为草甸试验区 C_4 >水稻试验区 D_0 >半流动沙丘 A_4 >玉米试验区 BC_4 >半固定沙丘 G_4 。

(2) T_{mean} , T_{\min} , T_{\max} 变化规律大致相同,年际差异较小, R_n 变化趋势与 T 有较高的一致性,最大值出现在夏季,最小值出现在冬季,风速春季最大,夏季最小,饱和水汽压差呈单峰曲线状,2017 年 4—7 月明显高于其他年份。

(3) VPD 对 ET_0 的通径系数为 0.614,是驱动 ET_0 变化的主要因子, R_n 的通径系数为 0.423,亦对 ET_0 产生较大作用, u_2 对 ET_0 的影响较弱,VPD, R_n , u_2 , T_{\max} 对回归方程估测可靠程度 E 的总贡献分别为 0.601, 0.402, 0.036, -0.046, 指标敏感性分析指出去掉饱和水汽压差后, E 由 0.993 降为 0.877,进一步说明 ET_0 对饱和水汽压差的变化最敏感。

参考文献:

- [1] 曹雯,段春锋,姚筠,等.1961—2010 年安徽省参考作物蒸散时空变化特征及成因[J].应用生态学报,2014,25(12):3619-3626.

- [2] 曹永强,肖春柳,李元菲,等.河北省春季潜在蒸散量变化特征与成因[J].水土保持研究,2019,26(5):195-201,209.
- [3] 刘昌明,孙睿.水循环的生态学方面:土壤—植被—大气系统水分能量平衡研究进展[J].水科学进展,1999(3):251-259.
- [4] 吕明权,张磊,吴胜军.嘉陵江流域参考蒸散的年际变化趋势及成因分析[J].水土保持研究,2019,26(3):77-85.
- [5] 冯禹,崔宁博,魏新平,等.川中丘陵区参考作物蒸散量时空变化特征与成因分析[J].农业工程学报,2014,30(14):78-86,339.
- [6] 娄忠秋,李桢.不同简化算法模型模拟都江堰灌区参考作物蒸散量[J].水土保持研究,2019,26(5):272-277,286.
- [7] Allen R G, Pereira L S, Raes D, et al. Crop Evapotranspiration: Guidelines for Computing Crop Water Requirements[R]. Rome: FAO,1998.
- [8] 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.
- [9] Um M J, Kim Y, Park D. Spatial and temporal variations in reference crop evapotranspiration in a mountainous island, Jeju, in South Korea[J]. Water, 2017,9(4). DOI:10.3390/w9040261.
- [10] 曹雯,申双和,段春锋.中国西北潜在蒸散时空演变特征及其定量化成因[J].生态学报,2012,32(11):3394-3403.
- [11] 安彬,肖薇薇.1955—2015年陕西省潜在蒸散量时空变化特征及成因[J].水土保持研究,2018,25(4):146-151.
- [12] 符娜,宋孝玉,夏露,等.云南省不同生态水文分区参考作物蒸散量算法适用性评价[J].农业机械学报,2017,48(5):208-217.
- [13] 严坤,王玉宽,徐佩,等.岷江源区 Hargreaves 法适用性与未来参考作物蒸散量预测[J].农业机械学报,2018,49(4):273-281.
- [14] 刘梦,罗玉峰,汪文超,等.基于天气预报的漳河灌区参考作物腾发量预报方法比较[J].农业工程学报,2017,33(19):156-162.
- [15] Valipour, Mohammad. Analysis of potential evapotranspiration using limited weather data [J]. Applied Water Science, 2017,7(1):187-197.
- [16] 刘昌明,张丹.中国地表潜在蒸散发敏感性的时空变化特征分析[J].地理学报,2011,66(5):579-588.
- [17] 曹永强,高璐,袁立婷,等.辽宁省潜在蒸散发量及其敏感性规律分析[J].地理科学,2017,37(9):1422-1429.
- [18] 栗晓玲,宋悦,牛纪苹,等.泾惠渠灌区潜在蒸散发量的敏感性及其变化成因[J].自然资源学报,2015,30(1):115-123.
- [19] 吕明权,张磊,吴胜军.嘉陵江流域参考蒸散的年际变化趋势及成因分析[J].水土保持研究,2019,26(3):77-85.
- [20] 包永志,刘廷玺,段利民,等.科尔沁沙地混生小叶锦鸡儿和人工杨树光合特性及其对气候的响应[J].干旱区研究,2019,36(2):420-429.
- [21] 宋小园,朱仲元,刘艳伟,等.通径分析在 SPSS 逐步线性回归中的实现[J].干旱区研究,2016,33(1):108-113.
- [22] 蔡甲冰,许迪,刘钰,等.冬小麦返青后腾发量时空尺度效应的通径分析[J].农业工程学报,2011,27(8):69-76.
- [23] 钱多,查天山,吴斌,等.毛乌素沙地参考作物蒸散量变化特征与成因分析[J].生态学报,2017,37(6):1966-1974.
- [24] 曹永强,李维佳.辽宁省潜在蒸散时空变化特征与成因[J].生态学报,2018,38(20):7276-7287.
- [25] Zhao L L, Xia J, Sobkowiak L, et al. Climatic characteristics of reference evapotranspiration in the Hai River Basin and their attribution[J]. Water, 2014,6:1482-1499.
- [26] 汪精海,齐广平,康燕霞,等.黑河流域潜在蒸散及其影响因素的不确定性分析[J].生态学杂志,2017,36(1):172-180.
- [27] 张雪松,闫艺兰,胡正华.不同时间尺度农田蒸散影响因子的通径分析[J].中国农业气象,2017,38(4):201-210.
- [28] 陈胜楠,孔喆,陈立欣,等.半干旱区城市环境下油松林分蒸腾特征及其影响因子[J].生态学报,2020,40(4):1269-1280.
- [29] 张红梅,吴炳方,闫娜娜.饱和水汽压差的卫星遥感研究综述[J].地球科学进展,2014,29(5):559-568.
- [30] 牛忠恩,胡克梅,何洪林,等.2000—2015年中国陆地生态系统蒸散时空变化及其影响因素[J].生态学报,2019,39(13):4697-4709.
- [31] 康丽娟,巴特儿·巴克,罗那那,等.阿勒泰地区不同时间尺度参考作物蒸散量的时空变化及影响[J].中国农业气象,2018,39(8):502-511.
- [32] 吴丽萍,陈洪松,连晋姣,等.喀斯特与非喀斯特地区参考作物蒸散量时空变化分析:以广西壮族自治区为例[J].中国生态农业学报,2017,25(10):1508-1517.