

DOI:10.11829/j.issn.1001-0629.2017-0614

戴黎聪,曹莹芳,柯浚,张法伟,杜岩功,郭小伟,曹广民. 气象因子对青藏高原高寒草甸参考蒸散的驱动特征. 草业科学, 2018, 35(9):2137-2147.

DAI L C, CAO Y F, KE X, ZHANG F W, DU Y G, GUO X W, CAO G M. Response of reference evapotranspiration to meteorological factors in alpine meadows on the Qinghai-Tibet Plateau. Pratacultural Science, 2018, 35(9):2137-2147.

气象因子对青藏高原高寒草甸 参考蒸散的驱动特征

戴黎聪^{1,2}, 曹莹芳^{1,2}, 柯浚^{1,2}, 张法伟¹, 杜岩功¹, 郭小伟¹, 曹广民¹

(1. 中国科学院西北高原生物研究所, 青海 西宁 810001; 2. 中国科学院大学, 北京 100039)

摘要: 青藏高原被誉为“中华水塔”, 在全球气候变化的大背景下, 青藏高原的水热平衡发生了一系列变化, 研究青藏高原蒸散与气候变化关系, 对于揭示气候变化对高原水文过程影响具有重要意义。基于 2011—2016 年 6 年自动观测连续数据, 选取净辐射总量、气温、饱和水汽压差、降水、风速、相对湿度、日照时数 7 个主要气象因子, 采用随机森林分析方法, 分析了参考蒸散的季节及年际变化趋势, 评估各气象因子对青藏高原参考蒸散的贡献。结果表明: 1) 在季节尺度上, 参考蒸散总体表现为单峰曲线, 即 1—7 月呈增加趋势, 7 月份达到最大值(132.48 mm), 7—12 月开始逐渐下降; 在年际尺度上, 参考蒸散总体呈现递增的趋势, 平均为 1 023.03 mm, 且每年以 29.61 mm 增加趋势上升。2) 净辐射是影响参考蒸散年内变异最重要的气象因子, 其他气象因子对其影响强弱排序为饱和水汽压差 > 最高气温 > 日照时数 > 平均气温; 对于生长季参考蒸散, 气象因子对其影响强弱依次排序为净辐射 > 日照时数 > 饱和水汽压差 > 最高气温。而降水、风速、最低气温和平均气温对年内参考蒸散和生长季参考蒸散影响较小。对非生长季参考蒸散, 其所受气象因子强弱排序为净辐射 > 饱和水汽压差 > 风速 > 最高气温 > 平均气温, 而相对湿度、日照时数、降水和最低气温对非生长季参考蒸散贡献较小。本研究表明, 青藏高原矮嵩草(*Kobresia humilis*)草甸参考蒸散主要受净辐射驱动, 且相比于平均温和最低气温, 最高气温对其参考蒸散影响更大, 这对于明晰高寒草甸水循环过程具有重要意义。

关键词: 中华水塔; 水热平衡; 全球气候变化; 水文过程; 随机森林; 季节和年际变化

中图分类号: S812.1 文献标志码: A 文章编号: 1001-0629(2018)09-2137-11*

Response of reference evapotranspiration to meteorological factors in alpine meadows on the Qinghai-Tibet Plateau

DAI Licong^{1,2}, CAO Yingfang^{1,2}, KE Xun^{1,2}, ZHANG Fawei¹,
DU Yangong¹, GUO Xiaowei¹, CAO Guangmin¹

(1. Northwest Institute of Plateau Biology, Chinese Academy of Sciences, Xining 810001, Qinghai, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

Abstract: The Qinghai-Tibet Plateau, also known as “China’s water tower”, has undergone a series of changes in the water-heat balance in its alpine meadows, which are attributed to global climate change. Therefore, it is vital to examine the effects of climate change on the hydrological processes on the plateau by analyzing the relationship between evapotranspiration and meteorological factors. In the present study, based on automatically observed meteorological data from 2011—2016, random forest analysis was applied to quantitatively evaluate the relative importance of seven major meteorological factors (e. g., net radiation, temperature, vapor pressure deficit, rainfall, wind speed, relative humidity, and sunshine hours) on the reference evapotranspiration (ET_0)

* 收稿日期: 2017-11-09 接受日期: 2018-04-03

基金项目: 国家自然科学基金项目(41730752、31770530); 青海省基础科学研究自然科学基金青年项目(2016-J-923Q)

第一作者: 戴黎聪(1993-), 男, 江西余干人, 在读硕士生, 主要从事水文生态学研究。E-mail: 18270821151@163.com

通信作者: 曹广民(1963-), 男, 陕西渭南人, 研究员, 博士, 主要从事生物地球化学循环研究。E-mail: caogm@nwipb.cas.cn

<http://cykx.lzu.edu.cn>

to explore the key meteorological factors affecting variation in ET_0 . In addition, the seasonal and interannual variation in ET_0 from 2011–2016 were also analyzed. The results show that 1) at the seasonal scale, ET_0 could be characterized by a unimodal relationship that increases from January to July, with the maximum value occurring in July (132.48 mm), then decreases from July to December. At the interannual scale, the ET_0 increased significantly from 2011–2016 with an average of 1 023.03 m^2). The net radiation was the most important factor affecting the annual variation in ET_0 , followed by vapor pressure deficit, maximum air temperature, sunshine hours, and mean air temperature. The impact of meteorological factors on the growing season ET_0 was ranked in the following order: net radiation > sunshine hours > vapor pressure deficit > maximum air temperature; rainfall, wind speed, minimum air temperature, and mean air temperature had little impact. The impact of meteorological factors on the non-growing season ET_0 was ranked in the following order: net radiation > vapor pressure deficit > wind speed > maximum air temperature > mean air temperature; relative humidity, sunshine hours, rainfall, and the minimum air temperature had little impact. Our results indicated that the ET_0 of an alpine *Kobresia meadow* in the northern Qinghai-Tibet Plateau was dominated by net radiation. Moreover, the maximum air temperature had stronger effects on the ET_0 than did mean air temperature or minimum air temperature, which could provide a new insight for the appropriate management of plateau water resources.

Keywords: China's water tower; water-heat balance; global climate change; random forest; hydrologic process; seasonal and interannual variation

Corresponding author: CAO Guangmin E-mail: caogm@nwipb.cas.cn

蒸散(ET_0)是高寒草甸水文循环和能量平衡的重要组成部分^[1],常用于表征大气蒸散发能力,是指假设作物水分充足、生长旺盛,一般将其定义作物高度为0.12 m,叶面阻力为 $70 s \cdot m^{-1}$,反照率为0.23参考作物蒸散量^[2],常作为水热通量及植被生产力评价的一项重要指标。近年来,在全球气候变化的大背景下,关于作物参考蒸散对气候变化的研究已经成为国内外众多学者研究的热点。

目前,许多研究表明,在世界各地潜在蒸散和参考作物蒸散普遍存在下降的趋势^[3],如澳大利亚^[4]、西班牙^[5]、以色列^[6]、美国^[7]和中国^[8]。由于估测方法及研究区域气候条件的不同,所估算的参考作物蒸散对气候变化的响应差异较大。近几年,敏感性分析被广泛用于气象因子对参考蒸散的驱动敏感特征分析,在西北地区敏感性研究中,生长季参考蒸散变化对相对湿度和太阳辐射的敏感性较大,而风速和气温对参考蒸散变化敏感性较小^[9];在澜沧江流域中,参考蒸散对日照时数较为敏感^[10];而在海河流域及长江流域中,参考蒸散对实际水汽压敏感性最强,然后依次是短波辐射、气温和风速^[11]。随着全球气候变暖,气温对参考蒸散影响也不可忽视,根据IPCC第4次评估报告,在过去的100年(1906–2005年)中,全球气温的平均增幅为 $0.74 ^\circ C$ ^[12]。有研究发现,在澳大利亚地区气温的升高是导致参考蒸散增加的主要因素^[13];而在中国、印度等国家,影响参考蒸散的主要驱动因子是太阳

辐射和风速^[14]。

青藏高原被誉为“中华水塔”,水资源丰富,在保证我国和东南亚水资源安全上具有重要的战略意义^[15],由于其独特的地形和气候特征,使之成为全球气候变化和水热循环研究的热点地区。随着全球气候变暖和人类活动的加剧,青藏高原水资源发生一系列变化,如冰川退缩、冻土消融、雪线上升、草地荒漠化^[15]。鉴于青藏高原独特的战略地位及其生态安全的脆弱性,有必要研究该区域蒸散发与气象因子之间的相互关系,虽然过去关于青藏高原蒸散发也有一定报道,但只是通过一些传统的相关和多元线性回归分析方法探讨气象因子对 ET_0 的变化影响^[16],由于各气象因子间存在严重的共线性,并不能准确定量评估各气象因子对 ET_0 的贡献。此外,对于一些影响青藏高原参考蒸散关键气象因子还存在一定的差异。有的学者认为,青藏高原的参考蒸散表现为逐渐减少趋势,主要是风速的减少导致^[17]。也有学者认为,风速和太阳辐射的减少是青藏高原参考蒸减少的主要原因^[18]。究竟气候变化如何影响高原蒸散发,高原蒸散发变化趋势及未来预测,都是亟待解决的问题。因此,本研究基于2011–2016年6年净辐射总量、气温、饱和水汽压差、降水、风速、相对湿度和日照时数自动观测连续数据,参考蒸散 ET_0 采用联合国粮食及农业组织(FAO)推荐的Penman-Monteith公式方法^[2],运用随机森林分析方法(random forest),试图定量评估各气象因子对

青藏高原参考蒸散的贡献, 确定影响青藏高原蒸散的主要影响因子, 旨在为我国青藏高原水资源安全和合理管理、利用提供重要的理论依据。

1 研究区概况

试验在中国科学院海北综合观测场高寒矮嵩草 (*Kobresia humilis*) 草甸进行 (37°37' N, 101°19' E), 其地处祁连山北支冷龙岭东段南麓的大通河谷, 位于青藏高原东北隅, 平均海拔 3 200 m, 属典型的高原大陆性季风气候, 年均气温 -1.7 °C, 年均降水约 580 mm, 且主要集中在生长季, 即 5—9 月。一年只有冷暖两季, 夏季温暖多雨, 冬季寒冷干燥。最暖月份在 7 月份, 平均气温 9.8 °C; 冬季最冷是在 1 月, 平均气温 -14.8 °C。该区域土壤类型为草毡寒冻锥形土 (mat-cryosod soil), 矮嵩草为建群种, 异针茅 (*Stipa aliena*)、垂穗披碱草 (*Elymus nutans*) 为主要优势种, 美丽风毛菊 (*Saussurea superba*)、羊茅 (*Festuca ovina*)、线叶龙胆 (*Gentiana farreri*) 和麻花苳 (*Gentiana straminea*) 等为次优势种^[19-20]。

2 数据来源与分析方法

2.1 数据来源

通过获取海北站高寒矮嵩草草甸 2011—2016 年 6 年净辐射总量、气温、饱和水汽压差、降水、风速、相对湿度、日照时数、蒸发皿蒸发量等日观测值数据, 其

中净辐射总量、降水、气温、相对湿度、风速、日照时数来自气象站自动观测数据, 饱和水汽压差通过相对湿度和实际水汽压换算得到, 蒸发数据通过小型标准蒸发皿观测获得。

2.2 分析方法

2.2.1 参考蒸散的计算 参考蒸散量基于 Penman-FAO 公式计算^[2]如下:

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

式中: ET_0 为参考蒸散 ($\text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$); A 为温度—水汽压曲线斜率 (kPa); R_n 为日净辐射总量 [$\text{MJ} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$]; G 为土壤热通量 [$\text{MJ} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$]; T 为日平均温度; γ 为干湿常数; u_2 为 2 m 处风速; e_s 为饱和水汽压 (kPa); e_a 为实际水汽压 (kPa); $e_s - e_a$ 为饱和水汽压差 (kPa)。

2.2.2 随机森林分析方法 随机森林与其他模型原理相似, 其主要原理是一种基于分类树的算法^[21]。根据树分类的大小, 可以定量分析自变量与因变量之间的相互关系, 且随机森林对变量之间的非线性作用和交互作用不敏感, 鉴于气象因子之间的交互作用显著 (表 1), 一般多元线性回归已不适用, 本研究基于随机森林分析方法, 对净辐射总量、饱和水汽压差、气温、降水、相对湿度、风速、日照时数等自变量与参考蒸散因变量之间进行随机森林分析。

表 1 各个变量之间的相关系数
Table 1 Correlation coefficients among the variables

相关系数 Correlation coefficient	MT	RH	NR	VPD	WS	R	SH	HT	LT
MT	1.00	0.50**	0.73**	0.74**	0.22**	0.30**	-0.05*	0.95**	0.97**
RH	—	1.00	0.15**	-0.09**	0.02	0.44**	-0.45**	0.32**	0.61**
NR	—	—	1.00	0.77**	0.13**	-0.05*	0.50**	0.81**	0.61**
VPD	—	—	—	1.00	0.25**	-0.06*	0.31**	0.81**	0.64**
WS	—	—	—	—	1.00	0.12**	-0.17**	0.11**	0.30**
R	—	—	—	—	—	1.00	-0.39**	0.18**	0.38**
SH	—	—	—	—	—	—	1.00	0.17**	-0.22**
HT	—	—	—	—	—	—	—	1.00	0.85**
LT	—	—	—	—	—	—	—	—	1.00

MT, 平均气温; RH, 日相对湿度; NR, 日净辐射总量; VPD, 饱和水汽压差; WS, 风速; R, 降水; SH, 日照时数; HT, 最高气温; LT, 最低气温; 下同。
* 表示显著相关 ($P < 0.05$), ** 表示极显著相关 ($P < 0.01$)。

MT, Average temperature; RH, relative humidity; NR, total net radiation; VPD, vapor pressure deficit; WS, wind speed; R, rainfall; SH, sunshine hours; HT, the maximum air temperature; LT, minimum air temperature; similarly for the following figures. * and ** indicate significant correlation at 0.05 and 0.01 levels, respectively.

3 结果与分析

3.1 参考蒸散与气象因子的变化趋势

季节尺度上,生长季参考蒸散明显高于非生长季参考蒸散,总体表现为单峰曲线,即1-7月呈逐渐增加,7月份达到最大值(132.48 mm),7-12月开始下降;年际尺度上,总体表现为逐渐增加趋势,平均每年参考蒸散为1 023.03 mm,且每年以29.61 mm增加趋势上升(图1)。

对于各气象因子的季节变化,日平均气温、气温日最高值、气温日最低值均表现为相同的变化趋势,1-8月逐渐升高,8月达到最大值,分别为11.18、18.01、3.38℃,8-12月呈下降趋势。净辐射总量和相对湿

度与温度变化趋势相似,即1-8月呈增加趋势,8月份达到最大值,分别为305.96 MJ·m⁻²和75.53%,8-12月逐渐下降。对于饱和水汽压差,1-6月逐渐增加,6月份达到最大值,6-12月呈下降趋势。而降水主要集中在生长季(80%),非生长季降水较少(图2);在年际尺度上,各气象因子总体表现为增加趋势,其中净辐射总量、日最高温度年平均值及日照时数分别每年以63.40 MJ·m⁻²、0.21℃和64.71 h速度增加(图3)。

3.2 参考蒸散与蒸发皿蒸发量的关系

参考蒸散与蒸发皿蒸发量呈显著相关关系($R^2 = 0.91, P < 0.01$)(图4),且可以在两者间建立一个数学表达式来表征参考蒸散与蒸发皿蒸发量相关关系。季

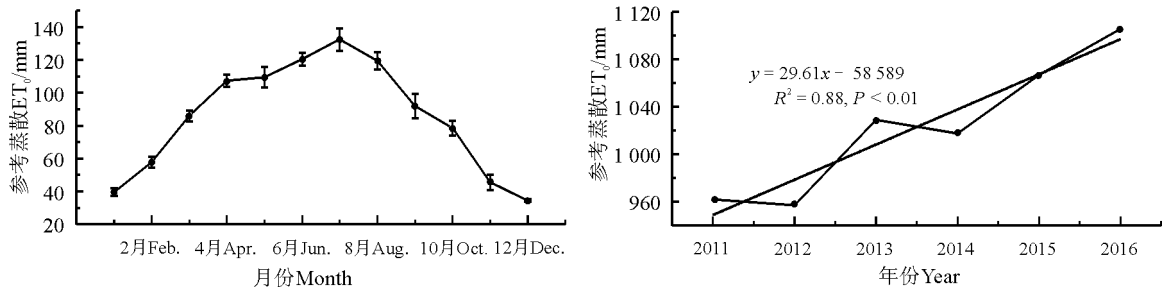


图1 参考蒸散的季节与年际变化

Fig. 1 Seasonal and interannual variation in reference evapotranspiration (ET₀)

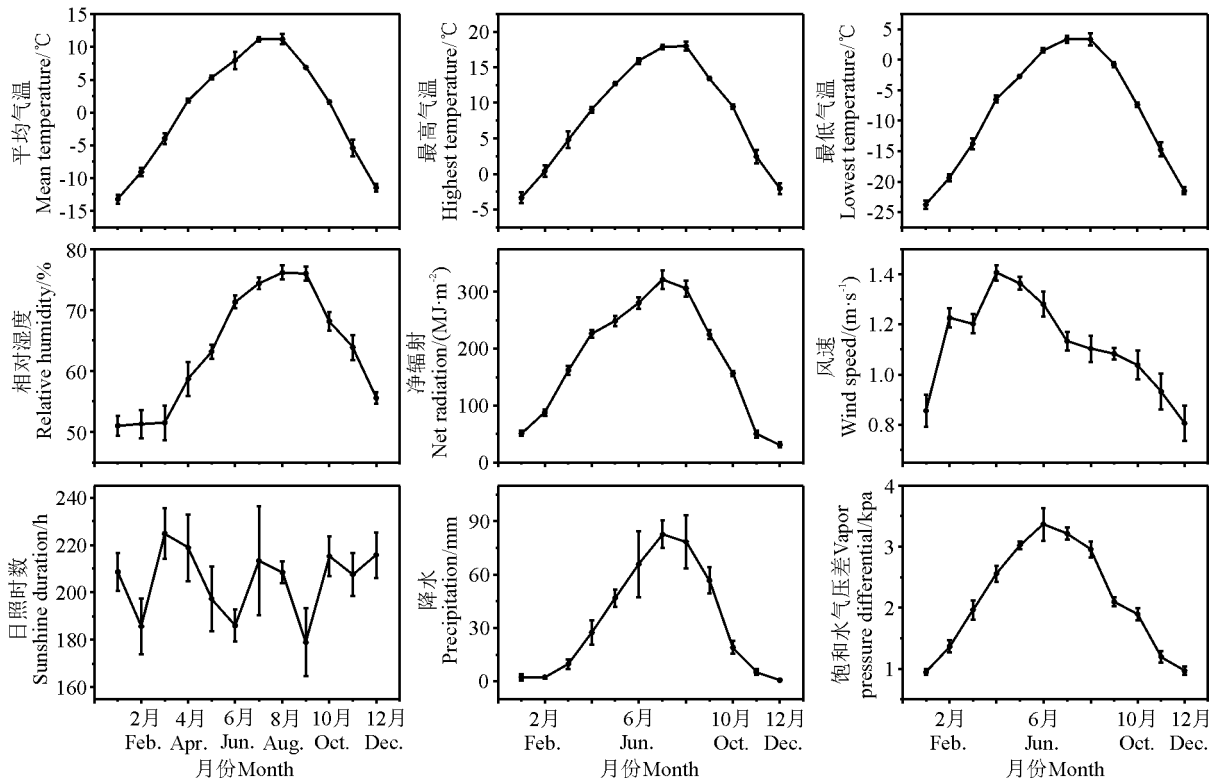


图2 气象因子的季节变化

Fig. 2 Seasonal variation in meteorological factors

<http://cykx.lzu.edu.cn>

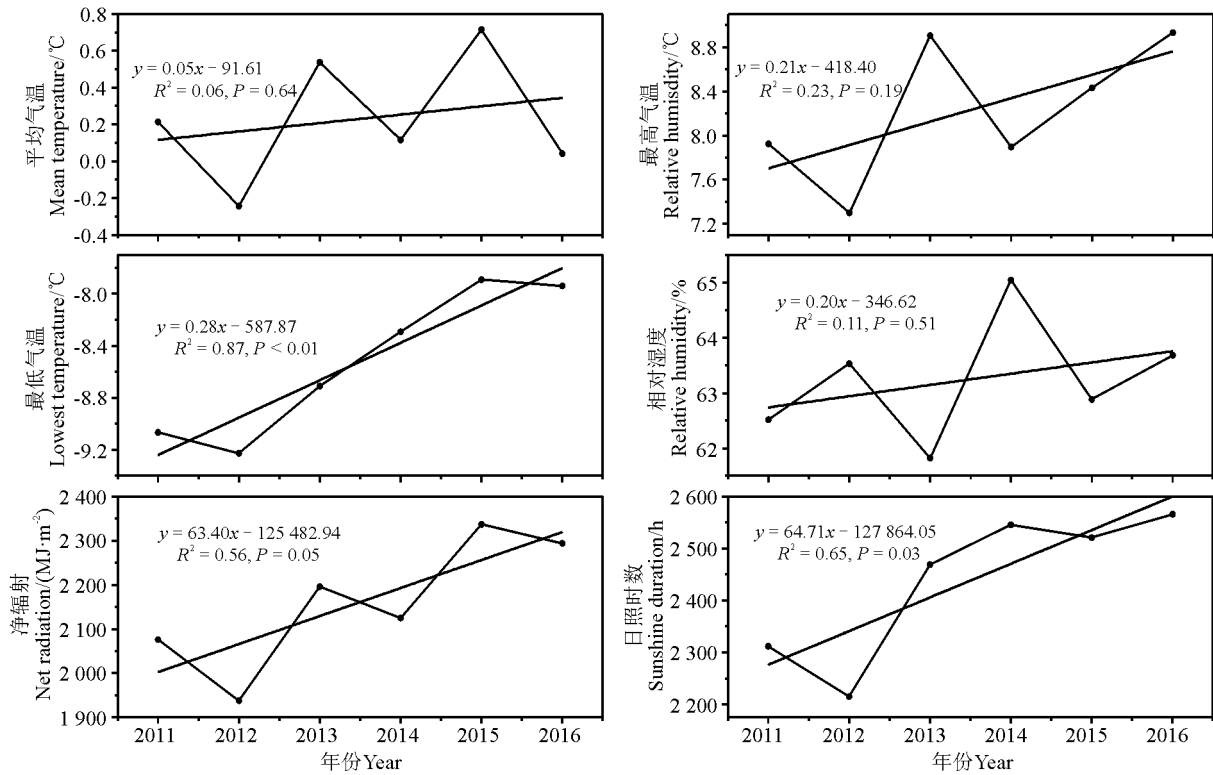


图 3 主要气象因子的年际变化

Fig. 3 Interannual variation in major meteorological factors

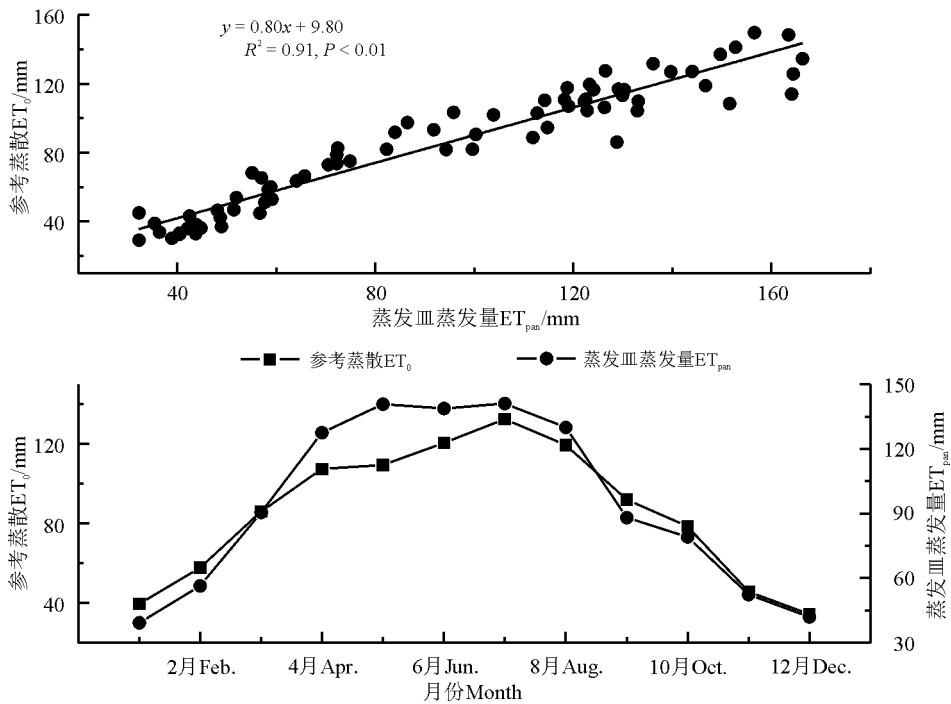


图 4 参考蒸散与蒸发皿蒸发量的关系

Fig. 4 Relationship between reference evapotranspiration and pan evaporation

节尺度上,参考蒸散与蒸发皿蒸发量变化趋势相同,即 1—7 月逐渐增加,7 月达到最大值,7—12 月呈减少趋势,但两者在不同月份也存在一定的差异,参考蒸散在

1—3 月高于蒸发皿蒸发量,而在 3—8 月,蒸发皿蒸发量明显高于参考蒸散,只有在 8—12 月,参考蒸散与蒸发皿蒸发量差异较小。总体上,蒸发皿蒸发量年均值

高于参考蒸散。

3.3 气象因子对参考蒸散的影响

结合随机森林两种因子重要性分析方法可知(图 5),各气象因子平均基尼指数递减度重要性指标与平均准确率降低度重要性指标排序顺序基本一致。影响参考蒸散年内变异的气象因子排序为净辐射>饱和水汽压差>最高气温>日照时数>平均气温>风速,而相对湿度、最低气温和降水对参考蒸散年内变异影响较小。对于生长季参考蒸散,气象因子对其影响大小为净辐射>日照时数>相对湿度>饱和水汽压差>最高气温。而降水、风速、最低气温和平均温度对生长季参考蒸散贡献较小。气象因子对非生长季参考蒸散的影响大小为净辐射>饱和水汽压差>风速>最高气温>平均气温。而最低气温、日照时数、相对湿度和降水对非生长季参考蒸散的影响较小。

此外,本研究通过随机森林进一步分析了生长季、非生长季、每年各主要气象因子对参考蒸散的影响,探讨了各主要气象因子对参考蒸散的局部效应(图 6)。参考蒸散的年内变异主要受净辐射、饱和水汽压差、最

高气温和日照时数影响,而最低气温、相对湿度、风速和降水对参考蒸散的年内变异影响较小,且除了相对湿度和降水,参考蒸散均随着各气象因子的增大而增大。对于饱和水汽压差,当其日值超过 4 kPa 时,饱和水汽压差对参考蒸散的影响贡献不大。当日最高气温和平均气温低于分别低于 10 和 -12 °C 时,气温对参考蒸散的贡献较小。在季节尺度上,生长季参考蒸散主要受净辐射、日照时数、相对湿度、饱和水汽压差和最高气温影响,降水、风速、最低气温和平均气温对生长季参考蒸散影响较小,且最大气温和降水量的不同对生长季参考蒸散驱动规律不同,当日最大气温低于 15 °C 时,气温对参考蒸散是负效应,当日最大气温高于 15 °C 时,气温对参考蒸散是正效应。同时,当日降水低于 5 mm 时,降水对生长季参考蒸散是负效应,当降水高于 5 mm 时,降水对生长季参考蒸散影响较小(图 7)。对于非生长季参考蒸散,净辐射、饱和水汽压、风速、最高气温和平均气温对其贡献较大,且当日饱和水汽压差大于 3.5 kPa 时,饱和水汽压对参考蒸散的影响较小,当日最高气温和日平均气温分别低于

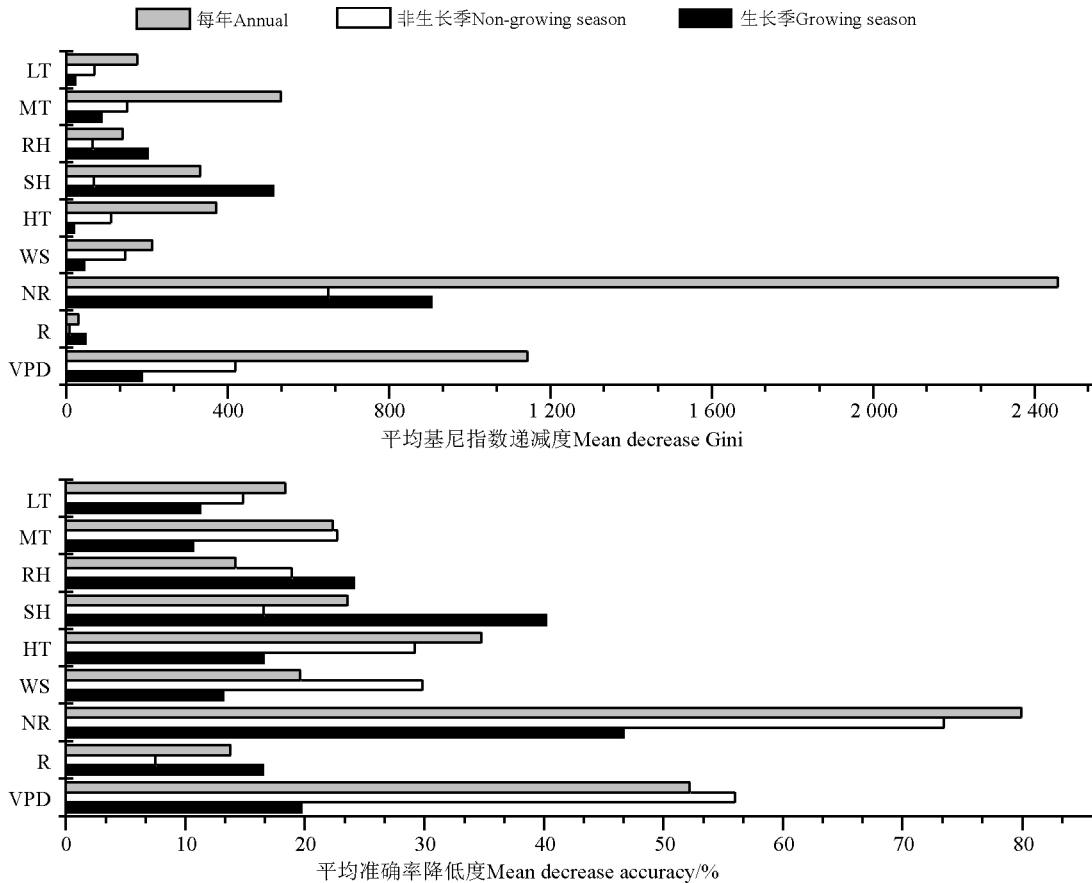


图 5 各气象因子对参考蒸散的贡献指标
 Fig. 5 Contribution index of meteorological factors to reference evapotranspiration

<http://cykx.lzu.edu.cn>

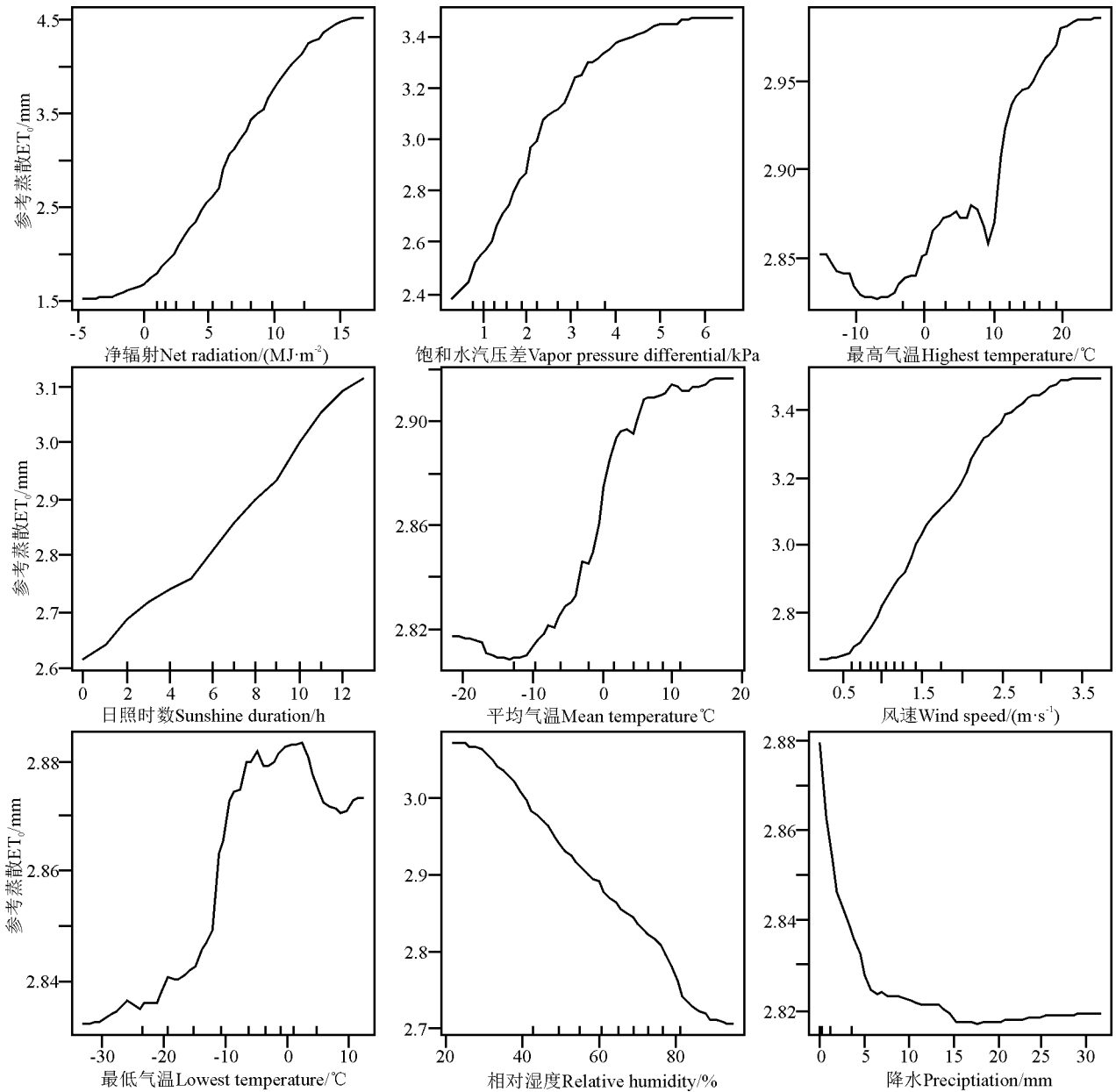


图 6 每年气象因子对参考蒸散的局部效应

Fig. 6 Partial A effect of annual meteorological factors on reference evapotranspiration

-5 和 -12.5 °C 时, 气温与非生长季参考蒸散负相关。此外, 当每天日照时数超过 9 h 时, 日照时数对参考蒸散影响急剧增加。同时, 当日降水低于 5 mm 时, 降水对参考蒸散产生负效应, 当降水高于 5 mm 时, 降水对非生长季参考蒸散影响微弱(图 8)。

4 讨论

本研究结果表明, 青藏高原高寒矮嵩草年内呈现单峰曲线趋势, 且生长季参考蒸散(5-9 月份)明显高于非生长季参考蒸散(1-4 月份和 10-12 月份)(图

1), 这与祁连山高寒草甸研究结果一致^[22]。由于生长季降水丰沛, 几乎 80% 的降水发生在生长季, 且生长季净辐射强, 日照时数长, 为植被蒸散发提供了良好的水热条件, 导致生长季参考蒸散明显高于非生长季参考蒸散。但本研究中高寒矮嵩草草甸平均每年蒸散为 1 023.03 mm, 高于祁连山老虎沟流域高寒草甸蒸散发量^[22], 这主要由于气候条件的不同, 本研究地点位于中国科学院海北综合观测场, 其年均温和年降水量分别为 -1.7 °C 和 560 mm, 而祁连山老虎沟流域年均温和年降水量分别为 -6 °C 和 390 mm。相比与祁连山

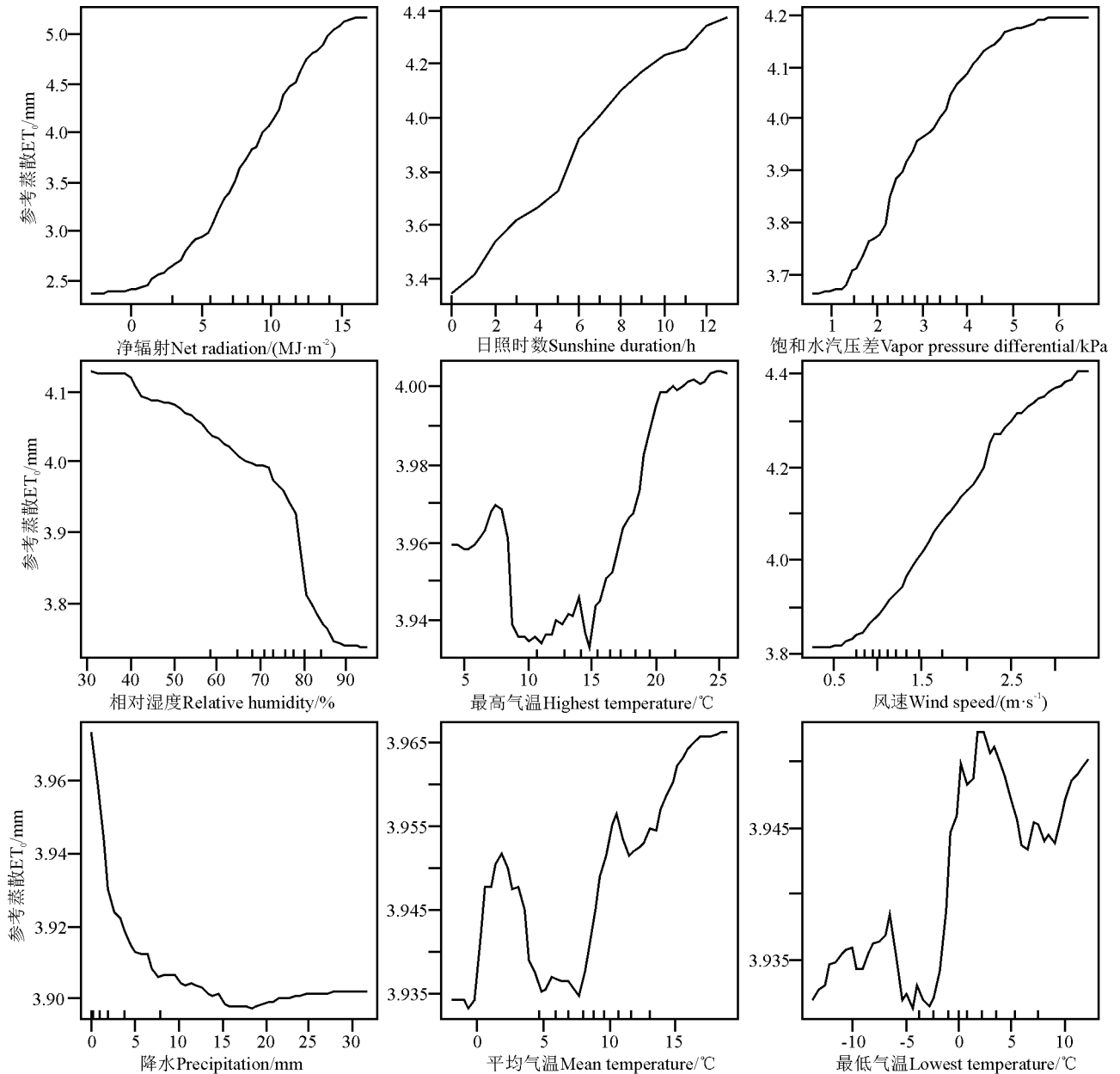


图7 生长季气象因子对参考蒸散的局部效应

Fig. 7 Partial B effect of meteorological factors on reference evapotranspiration in growing season

老虎沟流域,本研究区域热量与水分较为充足。因此,本研究每年蒸散发量明显高于祁连山老虎沟流域高寒草甸蒸散发量。对于青藏高原高寒矮嵩草草甸参考蒸散的年际变化,本研究发现,2011—2016年高寒矮嵩草草甸参考蒸散呈显著递增的趋势($P < 0.01$) (图1),这与青藏高原中部高寒草甸年际变化基本一致^[23],但与一些学者在青藏高原西南部研究结果不一致^[24]。以往许多研究表明,青藏高原西南部地区参考蒸散普遍存在下降的趋势^[24],甚至在一些西藏地区,还存在温度升高,蒸发下降现象(“蒸发悖论”)^[25],而本研究并没有发现“蒸发悖论”现象。本研究之所以与其他研

究结果存在较大的差异,一方面是由于研究蒸散发的方法不同,过去多采用蒸发皿蒸发量代表植被的蒸散发,但蒸发皿蒸发量并不代表植被的实际蒸散量,尽管蒸发皿蒸发量与参考蒸散在本研究中存在较高的相关性($R^2 = 0.91, P < 0.01$),但仍存在一定的差异,如1—3月份参考蒸散高于蒸发皿蒸发量,4—8月份蒸发皿蒸发量明显高于参考蒸散量,另外,本研究蒸散采用Penman-FAO公式计算,综合考虑了辐射项和空气动力项,相比于蒸发皿蒸发量,能够更好地反映植被的散发。另一方面由于气候条件不同,在本研究中,2011—2016年净辐射总量和日照时数及气温总体

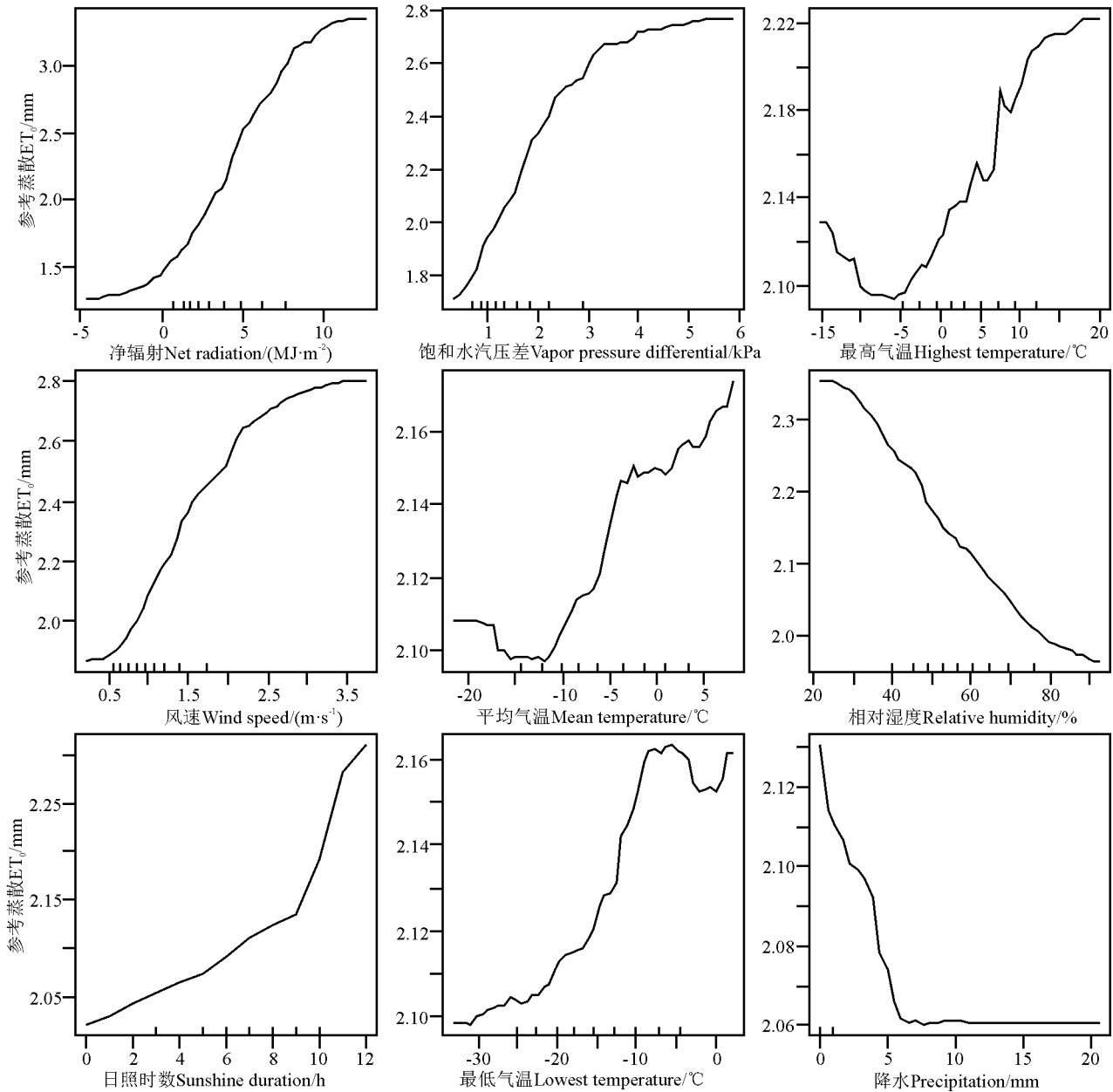


图 8 非生长季气象因子对参考蒸散的局部效应

Fig. 8 Partial C effect of meteorological factors on reference evapotranspiration in non-growing season

都呈逐渐增加趋势,且在辐射总量和日照时数达到显著性水平($P < 0.05$),尽管相对湿度每年呈增加趋势,在一定程度上削弱了蒸散作用(图 3),但净辐射、气温及日照时数增加对蒸散发的增加作用远大于相对湿度增加对蒸散发的减少作用,从而加快了表层土壤水分的蒸发和植被的蒸腾,导致参考蒸散每年呈逐渐增加趋势。

随着人类活动和气候变暖的加剧,关于青藏高原的水热循环,近几十年来已做了大量研究,但多集中在降水、气温的时空变化^[26],而关于气象因子对青藏高原的参考蒸散研究较为匮乏,且对于一些影响青藏高

原蒸散发的关键因子存在一定的争议。基于此,本研究通过随机森林分析发现,无论在年内尺度上还是在季节尺度上,净辐射始终是驱动青藏高原参考蒸散变化的最重要气象因子,这与刘晓英等^[27]在小汤山的研究结果一致。同时,在青藏高原唐古拉地区也发现,高寒草甸的蒸散发一年四季均受净辐射影响最大^[23]。此外,除了净辐射,其他重要气象因子对参考蒸散也有一定影响,且在不同季节,其响应程度存在一定的差异。在生长季,参考蒸散主要受净辐射、日照时数、相对湿度和饱和水汽压差、最高气温和降水影响,而温度、降水和风速对参考蒸散影响较小,由于生长季辐射

强、日照时数长,加上80%降水发生在生长季,土壤水分蒸发加强,植物蒸腾旺盛,导致生长季参考蒸散较大。对于非生长季参考蒸散,则主要受净辐射、饱和水汽压差、风速和最高气温影响,而日照时数、相对湿度、降水对其影响较小。由于非生长季日照时数短,降水少,气候干燥,风速较大。此外,本研究还发现,相比于平均气温和日最低值气温,日最大值气温对参考蒸散的影响最大,尤其是在生长季和每年尺度上,这与 Hurpet 和 Vanclooster^[28]的研究结果基本一致。这表明在未来全球气候变暖背景下,极端气候将会对高寒草甸参考蒸散产生较大影响。尽管本研究利用自动气象观测站气象数据,探讨了在生长季、非生长季,每年气象因子对参考蒸散的驱动规律,但参考蒸散的变化是多个因子的综合作用,由于青藏高原地形复杂,气象站点少,数据获取较难,本研究只是基于一个气象站点6年数据,时间周期较短,未来需要结合长时间多站点连

续观测,以期明晰青藏高原参考蒸散空间和时间变化规律。

5 结论

总体而言,参考蒸散每年以29.21 mm增加趋势上升,生长季参考蒸散明显高于非生长季参考蒸散,1—7月呈逐渐增加趋势,最大值出现在7月份(平均为132.48 mm),7—12月逐渐减少,且参考蒸散与蒸发皿蒸发量相关性较好($R^2=0.91, P<0.01$)。

无论在年内还是季节尺度上,净辐射总量始终是影响青藏高原参考蒸散最重要的驱动因子,而其他气象因子对参考蒸散的影响存在一定的差异,在生长季,影响参考蒸散的主要因子是日照时数、相对湿度和饱和水汽压差,而其他气象因子对参考蒸散的影响较小;在非生长季,参考蒸散的主要影响因子则是饱和水汽压、风速和最高气温。

参考文献 References:

- [1] 张建财,张丽,郑艺,田向军,周宇. 基于LPJ模型的中亚地区植被净初级生产力与蒸散模拟. 草业科学,2015,32(11):1721-1729.
ZHANG J C,ZHANG L,ZHENG Y,TIAN X J,ZHOU Y. Simulation of vegetation net primary productivity and evapotranspiration based on LPJ model in Central Asia. Pratacultural Science,2015,32(11):1721-1729.
- [2] ALLAN R G,PEREIRA L S,RAES D,SMITH M. Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements. Rome;FAO Irrigation & Drainage Paper,1998;56.
- [3] QIU X F,LIU C M,ZENG Y. Changes of pan evaporation in the recent 40 years over the Yellow River Basin. Journal of Natural Resources,2003,18(4):437-442.
- [4] RODERICK M L,HOBBS M T,FARQUHAR G D. Panevaporation trends and the terrestrial water balance. II. energybalance and interpretation. Geography Compass,2009,3(2):761-780.
- [5] ESPADAFOR M,LORITE I J,GAVILÁN P,BERENGENA J. An analysis of the tendency of reference evapotranspiration estimates and other climate variables during the last 45 years in Southern Spain. Agricultural Water Management,2011,98(6):1045-1061.
- [6] RAZYASEEF N,YAKIR D,SCHILLER G,COHEN S. Dynamics of evapotranspiration partitioning in a semi-arid forest as affected by temporal rainfall patterns. Agricultural & Forest Meteorology,2012,157(2):77-85.
- [7] SERRAT-CAPDEVILA A,SCOTT R L,SHUTTLEWORTH W J,VALDÉS J B. Estimating evapotranspiration under warmer climates: Insights from a semi-arid riparian system. Journal of Hydrology,2011,399(1):1-11.
- [8] LIU X,ZHENG H,ZHANG M,LIU C. Identification of dominant climate factor for pan evaporation trend in the Tibetan Plateau. Journal of Geographical Sciences,2011,21(4):594-608.
- [9] 曹雯,申双和,段春锋. 西北地区生长季参考作物蒸散变化成因的定量分析. 地理学报,2011,66(3):407-415.
CAO W,SHEN S H,DUAN C F. Quantification of the causes for reference crop evapotranspiration changes in growing season in northwest China. Acta Ecologica Sinica,2011,66(3):407-415.
- [10] 李斌,李丽娟,覃馥楚,李九一,柳玉梅,曾宏伟. 澜沧江流域潜在蒸散发敏感性分析. 资源科学,2011,33(7):1256-1263.
LI B,LI L J,QIN Y C,LI J Y,LIU Y M,ZENG H W. Sensitivity analysis of potential evapotranspiration in the Lancang River Basin. Resources Science,2011,33(7):1256-1263.
- [11] 刘小莽,郑红星,刘昌明,曹英杰. 海河流域潜在蒸散发的气候敏感性分析. 资源科学,2009,31(9):1470-1476.
LIU X M,ZHENG H X,LIU C M,CAO Y J. Sensitivity of the potential evapotranspiration to key climatic variables in the Haihe River Basin. Resources Science,2009,31(9):1470-1476.
- [12] SOLOMON S,QIN D,MANNING M,MARQUIS M,EVERYT K,TIGNOR M,MILLER H,CHEN Z. The physical science

- basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). *Computational Geometry*, 2013, 18(2): 95-123.
- [13] MCAFEE S A. Methodological differences in projected potential evapotranspiration. *Climatic Change*, 2013, 120(4): 915-930.
- [14] WANG X H, GUO M H, XU X Y, WEN J. Changing trends of reference crop evapotranspiration and impact factors in Yunnan Mengzhi Plain in recent 50 years. *Procedia Earth & Planetary Science*, 2012, 5(32): 326-334.
- [15] 王顺久. 青藏高原积雪变化及其对中国水资源系统影响研究进展. *高原气象*, 2017, 36(5): 1153-1164.
WANG S J. Progresses in variability of snow cover over the Qinghai-Tibetan Plateau and its impact on water resources in China. *Plateau Meteorology*, 2017, 36(5): 1153-1164.
- [16] 段春锋, 缪启龙, 曹雯. 塔克拉玛干沙漠周边地区潜在蒸散时空演变特征及其主要影响因素. *中国沙漠*, 2012, 32(6): 1723-1730. DUAN C F, MIAO Q L, CAO W. Spatio-temporal variations of potential evapotranspiration around Taklimakan desert and the main influencing factors. *Journal of Desert Research*, 2012, 32(6): 1723-1730.
- [17] ZHANG C G, SHEN Y J, LIU F G, MENG L. Changes in reference evapotranspiration over an agricultural region in the Qinghai-Tibetan plateau, China. *Theoretical & Applied Climatology*, 2014, 123(1/2): 1-9.
- [18] WANG Y, JIANG T, BOTHE O, FRAEDRICH K. Changes of pan evaporation and reference evapotranspiration in the Yangtze River basin. *Theoretical & Applied Climatology*, 2007, 90(1/2): 13-23.
- [19] 郭小伟, 杜岩功, 林丽, 李以康, 张法伟, 李茜, 刘淑丽, 欧阳经政, 曹广民. 青藏高原北缘 3 种高寒草地的 CH_4 、 CO_2 和 N_2O 通量特征的初步研究. *草业科学*, 2016, 33(1): 27-37.
GUO X W, DU Y G, LI L, LI Y K, ZHANG F W, LI Q, LIU S L, OUYANG J Z, CAO G M. CH_4 , CO_2 and N_2O flux among three types of alpine meadow in the north regions of Qinghai-Tibetan Plateau. *Pratacultural Science*, 2016, 33(1): 27-37.
- [20] 罗久富, 周金星, 赵文霞, 董林水, 郑景明. 围栏措施对青藏高原高寒草甸群落结构和稳定性的影响. *草业科学*, 2017, 34(3): 565-574.
LUO J F, ZHOU J X, ZHAO W X, DONG L S, ZHENG J M. Effect of fences on functional groups and stability of the alpine meadow plant community in the Qinghai-Tibet Plateau. *Pratacultural Science*, 2017, 34(3): 565-574.
- [21] BREIMAN L. Random forests. *Machine Learning*, 2001, 45(1): 5-32.
- [22] 李念, 孙维君, 秦翔, 杜文涛, 陈记祖, 郑昭佩. 2010—2014 年祁连山老虎沟流域高寒草甸蒸散发变化特征. *中国科技论文*, 2017, 12(9): 1015-1023.
LI N, SUN W J, QIN X, DU W T, CHEN J Z, ZHENG Z P. Characteristics of evapotranspiration in an alpine meadow in the Laohugou catchment in Qilian Mountains from 2010 to 2014. *China Science Paper*, 2017, 12(9): 1015-1023.
- [23] 王利辉, 何晓波, 丁永建. 青藏高原中部高寒草甸蒸散发特征及其影响因素. *冰川冻土*, 2018, 39(6): 1-6.
WANG L H, HE X B, DING Y J. Characteristics and influence factors of the evapotranspiration from a alpine meadow in central Qinghai Tibet Plateau. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2018, 39(6): 1-6.
- [24] 张娜, 金建新, 佟长福, 张红玲, 屈忠义. 西藏参考作物蒸散量时空变化特征与影响因素. *干旱区研究*, 2017, 34(5): 1027-1034.
ZHANG N, JIN J X, TONG C F, ZHANG H L, QU Z Y. Spatio temporal variation of evapotranspiration of referred crops and the affecting factors in Tibet. *Arid Zone Research*, 2017, 34(5): 1027-1034.
- [25] 白虎志, 董文杰, 马振锋. 青藏高原及邻近地区的气候特征. *高原气象*, 2004, 23(6): 890-897.
BAI H Z, DONG W J, MA Z F. Climatic characteristics of Qinghai-Xizang Plateau and its surrounding. *Plateau Meteorology*, 2004, 23(6): 890-897.
- [26] 李生辰, 徐亮, 郭英香, 钱维宏, 张国庆, 李川. 近 34 年青藏高原年气温变化. *中国沙漠*, 2006, 26(1): 27-34.
LI S C, XU L, GUO Y X, QIAN W H, ZHANG G Q, LI C. Change of annual air temperature over Qinghai-Tibet Plateau during recent 34 years. *Journal of Desert Research*, 2006, 26(1): 27-34.
- [27] 刘晓英, 李玉中, 钟秀丽, 曹金峰, 袁小环. 基于称重式蒸渗仪实测日值评价 16 种参考作物蒸散量 (ET_0) 模型. *中国农业气象*, 2017, 38(5): 278-291.
LIU X Y, LI Y Z, ZHONG X L, CAO J F, YUAN X H. Evaluation of 16 models for reference crop evapotranspiration (ET_0) based on daily values of weighing lysimeter measurements. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 2017, 38(5): 278-291.
- [28] HUPET F, VANCLOOSTER M. Effect of the sampling frequency of meteorological variables on the estimation of the reference evapotranspiration. *Journal of Hydrology*, 2001, 243(3): 192-204.

(执行编辑 苟燕妮)