

气候梯度下潜在蒸散分布差异及影响因素

张安宁,刘任涛*,杜灵通

(宁夏大学 西北土地退化与生态恢复国家重点实验室培育基地,宁夏 银川 750021)

摘要:在荒漠、半荒漠生境,选择气候梯度下的榆阳区、盐池县和沙坡头区为研究样地,利用各研究样地气象站点 11 a(2008—2018 年)逐日气象数据计算潜在蒸散量,分析潜在蒸散量的空间分布及影响因素。结果表明:1)平均风速、日照时数、平均气温空间分布均存在显著差异($P < 0.05$),而相对湿度空间分布无显著差异($P > 0.05$)。日照时数和平均气温均呈地带性特征分布,而平均风速呈非地带性分布。2)全年、春季和秋季潜在蒸散表现为榆阳区和沙坡头区显著>盐池县($P < 0.05$),夏季潜在蒸散表现为沙坡头区显著>榆阳区和盐池县($P < 0.05$),冬季潜在蒸散无显著变化($P > 0.05$)。3)相关分析表明,潜在蒸散与平均气温、平均风速、日照时数和相对湿度存在相关性($P < 0.05$)。多元回归分析表明,全年、春季和秋季潜在蒸散受平均气温、日照时数和平均风速的综合控制,而夏季主要受日照时数的影响,冬季受平均气温和相对湿度的影响。研究表明,潜在蒸散与气象因子密切相关,其空间变化受到平均气温、日照时数和平均风速的综合影响。但是,季节变化会改变气象因子的贡献率,夏季会削弱平均风速的贡献率,使夏季潜在蒸散的地带性特征明显,而冬季会提升相对湿度的贡献率,使冬季潜在蒸散分布无显著变化。

关键词:潜在蒸散;主导因子;空间分布;荒漠半荒漠生境

中图分类号:Q948.112 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-7461(2020)05-0023-06

Distribution Differences and Influencing Factors of Potential Evapotranspiration in Climate Gradients

ZHANG An-ning, LIU Ren-tao*, DU Ling-tong

(Breeding Base for the Key Lab. of Land Degradation and Ecological Restoration in Northwestern China, Ningxia University, Yinchuan 750021, Ningxia, China)

Abstract: Research plots with climate gradients were selected from Yuyang District, Yanchi County, and Shapotou District, which are located in desert and semi-desert areas. Data that were collected day by day from the meteorological stations in the sample sites from 2008 to 2018 were used to calculate the potential evapotranspiration (PE) and to analyze its spatial distribution pattern and influencing factors. The results showed that 1) significant differences ($P < 0.05$) were found in average wind speed (AWS), sunshine hours (SH) and mean temperature (MT), while for relative humidity (RH), no significant differences ($P > 0.05$) existed. The spatial distributions of the SH and MT presented zonal characters, while for the AWS, no zonal characters were observed. 2) The PEs of Yuyang District in the spring, autumn and whole year were significantly higher ($P < 0.05$) than those of Yanchi County. In summer, the PEs of Shapotou District were significantly higher than those of Yuyang District and Yanchi County. It was not significant in winter. 3) Correlation analysis demonstrated that PE was correlated with MT, AWS, SH, and RH ($P < 0.05$). Multiple regression analysis showed that PEs in the spring, autumn, and whole year were com-

收稿日期:2019-09-24 修回日期:2020-01-13

基金项目:国家自然科学基金(41867005, 41661054);宁夏青年拔尖人才培养工程项目(RQ0010);宁夏自然科学基金项目(2020AAC02014)。

作者简介:张安宁。研究方向:恢复生态学。E-mail:nxuzan@126.com

*通信作者:刘任涛,博士、博士后,研究员,硕士生导师。研究方向:恢复生态学。E-mail:nxliu2012@126.com

hensively controlled by MT, SH, and AWS. In summer, however, the key factor was SH, and in winter, MT, RH and PE were the controlling factors. It was concluded that PE was closely correlated with meteorological factors, and its spatial distribution was affected by the combination of MT, SH, and AWS. However, seasonal changes existed in the contribution rates of meteorological factors. In summer, the contribution rate of AWS was weakened, making the zonal characteristics of PE. In winter, the contribution rate of RH increased, there was no significant change in PE.

Key words: potential evapotranspiration; dominant factor; spatial distribution; desert and semi-desert environment

蒸散是水文-生态过程耦合的纽带,决定着土壤-植被-大气系统中的水分和热量传递^[1-3]。潜在蒸散(potential evapotranspiration, ET₀)作为大气蒸散能力的一个重要指标,是地表水循环和全球能量平衡的重要组成部分^[4],也是反映水文、气候的活跃因素^[5]。同时,它与降水共同决定区域气候干湿状况,亦是估算生态需水的关键因子^[6]。在水资源极度缺乏的荒漠、半荒漠地区,潜在蒸散是林业生态工程建设中实施有效人工造林、合理利用水土资源及缓解水资源匮乏的重要参考值,更是维护脆弱生态系统内稳定性及制定合理的生态恢复保护措施的重要依据^[7]。因此,开展荒漠、半荒漠地区潜在蒸散分布差异及影响因素研究,对于区域内提高林地水分利用效率、进行人工林建设和维持生态系统稳定性具有重要的生态学意义。

关于潜在蒸散量演变机制与驱动因子的研究在全球范围内已广泛展开^[4,8],北半球相对湿度增加和太阳辐射减少,南半球云量和气溶胶浓度增加均被认为是全球 ET₀降低的主要原因^[6,9-11]。同时,潜在蒸散变化具有明显的区域差异。A. Thomas 等^[12]研究 1954—1993 年中国的 ET₀发现,中国 35°N 以南 ET₀的主要影响因子为日照时数,35°N 以北的中国中部和西部分别受相对湿度和风速的影响最大。卓玛兰草等^[13]研究发现,甘肃地区年潜在蒸散 772~1 105 mm,表现为自北向南递减,受太阳总辐射、日照时数和最高气温影响较大。曹雯等^[14]研究发现,中国西北地区年潜在蒸散的变化主要归因于风速和气温,相对湿度和日照时数的作用较小。综合分析表明,不同地区潜在蒸散变化对气象因子的响应存在差异,西北地区受日照时数和气温的影响较大^[14]。但是,着重关注荒漠、半荒漠地区潜在蒸散区域差异的研究报道较少。

西北荒漠、半荒漠地区地域广阔,深居内陆,是三北防护林建设的重要环节,亦是我国极为重要的生态屏障^[15]。其特殊地理位置,水资源短缺成为制约西北林地建设的“瓶颈”^[14]。潜在蒸散作为制定水资源优化配置的重要依据,它的区域变化特征及

变化原因值得关注。本研究选择荒漠半荒漠地区不同气候梯度下的榆林站、盐池站、沙坡头站为对象,选取 2008—2018 年榆林站、盐池站和沙坡头站点实测数据,利用 Penman-Monteith 公式计算 3 个地区 ET₀,探究荒漠、半荒漠地区在不同气候梯度下潜在蒸散量的分布差异,并利用相关性分析和多元回归法分析各气象因子对潜在蒸散的影响作用,研究结果有助于深入理解荒漠、半荒漠地区潜在蒸散分布差异的原因,同时为林业生态工程实践中水资源的科学配置与利用及脆弱生态环境恢复保护提供依据。

1 研究区概况

以 2008—2018 年逐日降雨数据为基础,在西北地区划分不同干湿气候区,沿经度地带性水平分布筛选出陕西榆林市榆阳区、宁夏吴忠市盐池县和中卫市沙坡头区 3 个典型地区为研究样地。3 个样地在西北荒漠半荒漠地区中属于中部气候过渡带,在整体生态环境的构建与恢复中处于重要地位,榆林市榆阳区,位于毛乌素沙地南部(36°57'—39°35'N, 107°28'—111°15'E),属于东部季风气候区和西北干旱气候区的过渡带。年平均气温 9.2°C,最高气温 37.3°C,最低气温 -27.8°C。年均降水量 514 mm,主要集中在 7—9 月,占全年降水量的 80%。主要土壤类型为黄绵土、风沙土和新积土。盐碱土、草甸土和棉纱土等呈区域性分布。土壤质地偏砂,质地粗大、通透性强、易于耕作,但保水保肥能力较差。主要植被特征以沙地植被为主,并与人工灌木林镶嵌分布,构成乔灌混交、草灌结合、针阔混交的多结构类型植被。吴忠市盐池县,位于毛乌素沙地南缘(37°05'—38°10'N, 106°30'—107°39'E),处于干旱草原向半干旱草原的过度地带,属于温带大陆性气候。年平均气温 8.7°C,最低气温 -29.4°C;最热月(7 月)平均气温 38.7°C。年平均降水量 294 mm,主要集中在 7—9 月,占全年降水量的 60%以上,且年际变率大。该县域地带性土壤主要有黄绵土与灰钙土、淡灰钙土;非地带性土壤主要有风沙土、盐碱

土和草甸土等,其中风沙土在中北部分布广泛。土壤质地多为粉壤土、沙壤土和沙土,结构松散,肥力较低。主要植被特征以荒漠草原植被为主,并与人工柠条锦鸡儿(*Caragana korshinskii*)灌木林镶嵌分布。中卫市沙坡头,位于腾格里沙漠东南缘(36°58'—37°42'N,104°17'—105°35'E),处于阿拉善高原荒漠与荒漠草原过度地带,为典型的草原化荒漠地带,属于典型的温带大陆性季风气候^[13]。年平均气温9.9℃,最低气温-27.1℃,最高气温38.9℃,冬夏昼夜温差大^[13]。年均降水量186 mm,降水年际变化大,且分布不均匀,主要集中于6—8月,占全年降水量的60%。土壤以细粒沙为主,以风沙土及灰棕荒漠土分布最广^[13]。主要植被特征以人工固沙灌丛为主,包括花棒(*Hedysarum scoparium*)、柠条锦鸡儿、沙拐枣(*Calligonum mongolicum*)、沙木蓼(*Atraphaxis bracteata*)等,并伴生有沙蒿(*Artemisia desertorum*)、沙米(*Agriophyllum squarrosum*)等固沙先锋植物。

2 材料与方法

2.1 数据来源

沙坡头、盐池、榆林3个气象站气象资料来源于国家气象信息中心(<http://www.escience.gov.cn/>),为2008—2018年的逐日气象资料,包括最高气温、最低气温、平均气温、相对湿度、最小相对湿度、平均风速(10 m·s⁻¹)和日照时数。采用气象学标准进行季节划分,即春季3—5月,夏季6—8月,秋季9—11月,冬季12月—次年2月^[6]。

2.2 Penman-Monteith公式计算

潜在蒸散量(ET₀)计算采用世界粮农组织(FAO)推荐并修改的Penman-Monteith(P-M)公式^[5]:

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

式中,ET₀为潜在蒸散量/(mm·d⁻¹);Δ为饱和水气压—温度曲线的斜率/(kPa·℃⁻¹);R_n为地表净辐射/(MJ·m⁻²·d⁻¹);G为土壤热通量/(MJ·

m⁻²·d⁻¹),在逐日尺度上计算ET₀时,可以忽略不计;T为平均气温/℃;U₂为2 m高风速/(m·s⁻¹);e_s为饱和水气压/kPa;e_a为实际水汽压/kPa;γ为干湿表常数/(kPa·℃⁻¹)^[16]。

气象站观测10 m高风速可用FAO推荐公式转换2 m高风速^[16-17]:

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

式中,U₁₀为10 m高出风速观测值(m·s⁻¹)。

2.3 贡献率计算

贡献率计算由多元回归分析判断气候因子对潜在蒸散量的贡献量。气候因子和潜在蒸散量都要进行标准化处理^[18]。计算公式如下:

$$Y = aX_1 + bX_2 + cX_3 + \dots \quad (3)$$

$$n_1 = \frac{|a|}{|a| + |b| + |c| + \dots} \quad (4)$$

式中,Y为因变量标准值;X₁,X₂,X₃,…为自变量;a,b,c,…分别为对应变量系数;n₁为X₁的相对贡献率^[18]。

2.4 数据分析

用SPSS 22.0软件进行统计分析。采用双因素和单因素方差分析(ANOVA)和最小显著差异法(LSD)比较不同数据组间的显著差异。采用Pearson相关系数分析潜在蒸散量与气象因子间的关系。采用多元回归法分析主要气象因子(平均风速、平均气温、相对湿度和日照时数)对潜在蒸散量变化的影响程度及其贡献量。

3 结果与分析

3.1 气象因子

3个样地间平均风速、日照时数、平均气温年际变化均存在显著差异(*P*<0.05),而相对湿度年际变化表现为3个样地间无显著差异(*P*>0.05)(表1)。平均气温和日照时数均表现为沙坡头区显著>榆阳区和盐池县(*P*<0.05),而平均风速表现为榆阳区显著>盐池县和沙坡头区(*P*<0.05)。

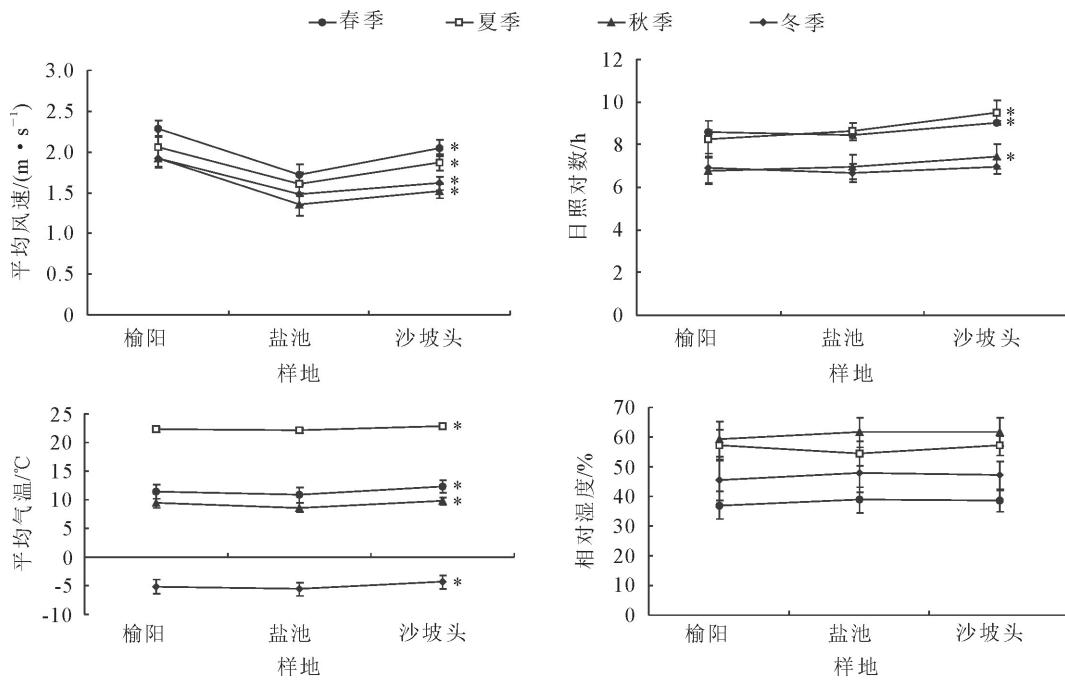
4个季节中,平均风速在3个样地间差异显著且变化一致(*P*<0.05),均表现为榆阳区>沙坡头区>盐池县(图1)。

表1 气象因子年际变化

Table 1 Interannual variations of meteorological factors

来源	平均风速/(m·s ⁻¹)	日照时数/h	平均气温/℃	相对湿度/%
榆阳	2.04±0.09A	7.62±0.52B	9.42±0.56B	50.11±3.27A
盐池	1.54±0.12C	7.67±0.23B	8.89±0.64C	51.00±1.68A
沙坡头	1.76±0.07B	8.20±0.19A	10.08±0.51A	51.39±1.77A

注:表中数据为平均值±标准差;同列不同字母表示*P*<0.05水平上的显著差异性。下同。



注: * 表示样地间 $P < 0.05$ 水平上的显著差异性。下同。

图 1 气象因子季节变化

Fig. 1 Seasonal changes in meteorological factors

春季, 日照时数表现为沙坡头区显著 $>$ 盐池县 ($P < 0.05$), 而二者与榆阳区区间均无显著差异 ($P > 0.05$)。夏季, 日照时数表现为沙坡头区显著 $>$ 榆阳区和盐池县 ($P < 0.05$), 而后二者之间无显著差异 ($P > 0.05$)。秋季, 日照时数表现为沙坡头区显著 $>$ 榆阳区 ($P < 0.05$), 而二者与盐池县间均无显著差异 ($P > 0.05$)。冬季, 日照时数表现为 3 个样地间无显著差异 ($P > 0.05$)。

春季, 平均气温表现为沙坡头区显著 $>$ 盐池县 ($P < 0.05$), 而二者与榆阳区区间均无显著差异 ($P > 0.05$)。夏季, 平均气温表现为沙坡头区显著 $>$ 盐池县和榆阳区 ($P < 0.05$), 而后二者之间无显著差异 ($P > 0.05$)。秋季, 平均气温表现为榆阳区与沙坡头区间无显著差异 ($P > 0.05$), 而二者显著 $>$ 盐池县 ($P < 0.05$)。冬季, 平均气温表现为沙坡头区显著 $>$ 盐池县 ($P < 0.05$), 而二者与榆阳区区间无显著差异 ($P > 0.05$)。

在 4 个季节中, 相对湿度在 3 个样地间均无显著差异 ($P > 0.05$)。

3.2 潜在蒸散

潜在蒸散量年际变化表现为榆阳区与沙坡头区间无显著差异 ($P > 0.05$), 而二者显著 $>$ 盐池县 ($P < 0.05$) (图 2)。

从表 2 可以看出, 在春季和秋季, 潜在蒸散量表现为榆阳区与沙坡头区之间无显著差异 ($P > 0.05$), 而二者显著 $>$ 盐池县 ($P < 0.05$)。在夏季,

潜在蒸散量表现为沙坡头区显著 $>$ 榆阳区和盐池县 ($P < 0.05$), 而后二者之间无显著差异 ($P > 0.05$)。冬季潜在蒸散量表现为 3 个气象站点间无显著差异 ($P > 0.05$)。

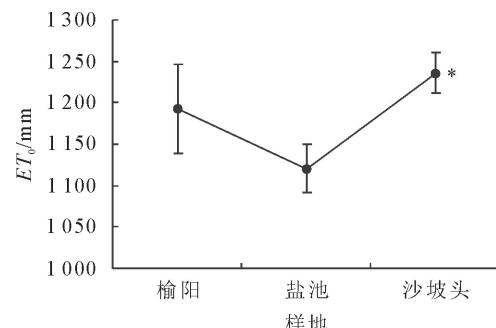


图 2 潜在蒸散量年际变化

Fig. 2 Interannual variation of potential evapotranspiration

双因素方差分析表明(表 3), 不同样地与季节之间以及二者之间对潜在蒸散量存在极显著的交互作用。

3.3 影响潜在蒸散变化的主导因子

全年、春季、秋季和冬季潜在蒸散均与平均风速、日照时数和平均气温间呈正相关 ($P < 0.05$), 而与相对湿度间呈负相关 ($P < 0.05$) (表 4)。夏季潜在蒸散与日照时数和平均气温间呈正相关 ($P < 0.05$), 而与相对湿度间呈负相关 ($P < 0.05$)。

平均气温、日照时数和平均风速均对潜在蒸散有正贡献作用, 而相对湿度对潜在蒸散有负贡献作用(表 5)。在全年潜在蒸散中, 平均气温贡献率最

高,日照时数和平均风速贡献率较高。在春季和冬季潜在蒸散中,平均气温贡献率最高,春季平均风速贡献率较高,而冬季相对湿度贡献率较高。在夏季和秋季潜在蒸散中,日照时数贡献率最高,夏季平均

风速贡献率较高,而秋季平均气温贡献率较高。全年、春季和冬季潜在蒸散变化的主导因子是平均气温,夏季和秋季潜在蒸散变化的主导因子是日照时数。

表 2 潜在蒸散量季节变化

Table 2 Seasonal changes in potential evapotranspiration

来源	春季	夏季	秋季	冬季
榆阳	392.65±28.36A	478.9±23.84B	215.4±15.37A	108.24±12.97A
盐池	354.41±16.49B	467.85±16.42B	198.56±14.01B	101.65±12.53A
沙坡头	399.88±19.75A	506.15±12.66A	219.93±13.37A	111.74±12.41A

表 3 潜在蒸散量的双因素方差分析

Table 3 Two-way analysis of variance of potential evapotranspiration

来源	d_f	F	P
样地	2	31	0.000
季节	3	3 183	0.000
样地×季节	6	4	0.003

表 4 潜在蒸散与气象因子间的相关关系

Table 4 Correlation between potential evapotranspiration and meteorological factors

季节	平均风速 $(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	日照 时数/h	平均 气温/°C	相对 湿度/%
全年	0.578**	0.597**	0.791**	-0.398*
春季	0.545**	0.699**	0.830**	-0.575**
夏季	0.294	0.795**	0.390*	-0.353*
秋季	0.524**	0.644**	0.447**	-0.644**
冬季	0.617**	0.418*	0.781**	-0.749**

表 5 潜在蒸散的气候因子主次排序

Table 5 Ranking of climatic factors for potential evapotranspiration

季节	PCA 1	PCA 2	PCA 3	PCA 4
全年	TEM(31%)	WIN(30%)	SSD(29%)	RHU(-10%)
春季	TEM(38%)	WIN(29%)	SSD(19%)	RHU(-14%)
夏季	SSD(37%)	WIN(27%)	RHU(-21%)	TEM(16%)
秋季	SSD(31%)	TEM(27%)	RHU(-21%)	WIN(20%)
冬季	TEM(41%)	RHU(-33%)	WIN(16%)	SSD(9%)

注:TEM:平均气温;SSD:日照时数;WIN:平均风速;RHU:相对湿度。
括号内表示气象因子的贡献率。

4 结论与讨论

在气候梯度下,全年和季节目照时数和平均气温呈地带性分布,而平均风速呈非地带性分布。受气象因子和季节变化的综合影响,夏季潜在蒸散呈地带性特征分布,而全年、春季、秋季和冬季潜在蒸散的地带性特征不明显。潜在蒸散与气象因子密切相关,其空间变化受到平均气温、日照时数和平均风速的综合影响。但是,季节变化会改变气象因子的贡献率,夏季会削弱平均风速的贡献率,使夏季潜在蒸散的地带性特征明显,而冬季会提升相对湿度的

贡献率,使冬季潜在蒸散分布无显著变化。

不同地区气候条件有显著的区域差异^[19]。本研究中,不同气候梯度下日照时数和平均气温表现出相似的分布规律,平均气温和日照时数在春季、夏季、秋季和全年均出现地带性特征,表现为沙坡头区显著>盐池县和榆阳区,这与陈少勇等^[20]研究西北地区日照时数变化结果不同,陈少勇等^[22]研究表明西北地区日照时数沿经度地带性由东向西递减。沙坡头区位于腾格里沙漠东南缘,本研究区最西端,受大陆季风影响强烈,降雨量低且区域云量最小,大气透明度高,受太阳辐射强烈,导致沙坡头区日照时数和平均气温最高^[22-23]。但是,全年和季节平均风速表现出非地带性特征,表现为榆阳区>沙坡头区>盐池县。西北地区受大陆性季风的影响,风力较大,多吹西北风,榆阳区和沙坡头区分别位于毛乌素沙地和腾格里沙漠的东南部,进而受风力影响较大,而盐池县位于贺兰山山脉南侧,其山脉阻隔有效削弱了大陆性季风,降低了盐池县的平均风速^[14,20-21]。而全年和季节相对湿度表现为研究样地间无显著差异。这是由于研究区地处内陆,远离海洋,且周围山岭环绕,海洋水汽难以到达,导致样地间相对湿度差异较小^[14-15,24]。

潜在蒸散变化因受不同样地气象因子变化的影响而具有差异性^[25]。本研究中,受经度地带性影响,样地间潜在蒸散量的变化在全年、春季和秋季均表现为沙坡头区略>榆阳区,且均显著>盐池县,这与安彬等^[26]基于 1955—2015 年气象资料分析陕西省结果相似。全年、春季和秋季潜在蒸散与平均风速、日照时数和平均气温均呈显著相关(表 4),且气象因子对全年、春季和秋季潜在蒸散均有较高的贡献率。受到平均风速的非地带性特征和平均气温、日照时数的地带性特征的综合影响,共同促进榆阳区和沙坡头区潜在蒸散的升高。但是,夏季潜在蒸散表现为沙坡头区显著>盐池县和榆阳区,相关性表明夏季潜在蒸散量与平均风速不相关,而与日照时数显著相关。这与钱多等^[6]基于 1955—2014 年

气象资料分析毛乌素沙地结果相似,夏季毛乌素沙地潜在蒸散呈自西向东递减。说明夏季会削弱风速对潜在蒸散的影响,使得潜在蒸散的地带性特征更为明显。而冬季潜在蒸散量在3个样地间无显著差异,冬季潜在蒸散量与平均气温、相对湿度和平均风速的相关性明显高于日照时数^[14]。同时,相对湿度在冬季潜在蒸散变化中贡献率较高,因此相对湿度无显著差异可能是潜在蒸散无显著变化的原因。表明季节变化会削弱潜在蒸散的地带性特征。

已有研究表明,不同地区不同的气候背景条件使潜在蒸散对气象因子的响应具有明显的区域差异^[19]。黄土高原地区潜在蒸散变化与平均气温和日照时数极显著相关^[27],而石羊河流域潜在蒸散变化与相对湿度相关性最高。本研究中,潜在蒸散与气象因子密切相关,全年、春季和冬季潜在蒸散主导因子是平均气温,夏季和秋季潜在蒸散主要因子是日照时数。这与曹雯等^[14]基于1961—2009年气象资料分析西北干旱半干旱区结果相似。气象因子的区域差异将直接影响潜在蒸散的空间分布特征。

参考文献:

- [1] KATUL G G, OREN R, MANZONI S, et al. Evapotranspiration: a process driving mass transport and energy exchange in the soil-plant-atmosphere-climate system[J]. *Reviews of Geophysics*, 2012, 50(3): RG3002.
- [2] 何慧娟,王钊,董金芳,等.基于MODIS产品的秦岭地区NDVI、地表温度和蒸散变化关系分析[J].西北林学院学报,2019,34(4):179-184,191.
HE H J, WANG Z, DONG J F, et al. NDVI, LST and ET variation analysis based on MODIS datasets in the Qinling Mountains [J]. *Journal of Northwest Forestry University*, 2019, 34(4): 179-184, 191. (in Chinese)
- [3] 韦振锋,陈思源,黄毅.1981-2010年陕西潜在蒸散量时空特征及其对气候因子的响应[J].地理科学,2015,35(8):1033-1041.
WEI Z F, CHEN S Y, HUANG Y. Spatial and temporal characteristics of potential evaporation and climatic factors on the impact in Shaanxi Province in 1981-2010 [J], *Scientia Geographica Sinica*, 2015, 35(8): 1033-1041. (in Chinese)
- [4] 郭旭新,赵英,高志永,等.基于SPEI的陕北黄土丘陵区干旱特征及影响因素分析[J].西北林学院学报,2019,34(1):69-76.
GUO X X, ZHAO Y, GAO Z Y, et al. SPEI based drought characters and factors in Loess Hilly Regions of northern Shaanxi [J], *Journal of Northwest Forestry University*, 2019, 34(1): 69-76. (in Chinese)
- [5] 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.
CAO Y Q, LI W J. Pato-temporal distribution characteristics of potential evapotranspiration and impact factors in Liaoning Province [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, 38(20): 7276-7287. (in Chinese)
- [6] 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.
QIAN D, CHA T S, WU B, et al. Spatio-temporal distribution characteristics of reference crop evapotranspiration in the Mu Us desert [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2017, 37(6): 1966-1974. (in Chinese)
- [7] CHATTOPADHYAY N, HULME M. Evaporation and potential evapotranspiration in India under conditions of recent and future climate change[J]. *Agricultural Land Forest Meteorology*, 1997, 87(1): 55-73.
- [8] ESPADAFOR M, LORITE I J, GAVILÁN P, et al. An analysis of the tendency of reference evapotranspiration estimates and other climate variables during the last 45 years in Southern Spain[J]. *Agricultural Water Management*, 2011, 98(6): 1045-1061.
- [9] RODERICK M L, FARQUHAR G D. Changes in Australian pan evaporation from 1970 to 2002[J]. *International Journal of Climatology*, 2004, 24(9): 1077-1090.
- [10] 李亚,胡小柯,魏怀东,等.腾格里沙漠南缘天然群落主要种群空间分布格局研究[J].西北林学院学报,2017,32(2):67-72.
LI Y, HU X K, WEI H D, et al. Spatial patterns of the main populations of the natural vegetation community in the south margin area of Tenggeli Desert [J]. *Journal of Northwest Forestry University*, 2017, 32(2): 67-72. (in Chinese)
- [11] 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. (in Chinese)
- [12] THOMAS A. Spatial and temporal characteristics of potential evapotranspiration trends over China[J]. *International Journal of Climatology*, 2000, 20(4): 381-396.
- [13] 卓玛兰草,刘普幸,张亚宁,等.甘肃黄土高原区潜在蒸散量时空变化与成因研究[J].水土保持研究,2012,19(1):70-75.
ZHUOMA L C, LIU P X, ZHANG Y N, et al. Study on temporal and spatial changes of the potential evapotranspiration and its impact factors in Loess Plateau of Gansu Province [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2012, 19(1): 70-75. (in Chinese)
- [14] 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.
- [15] 王琼,张明军,潘淑坤,等.长江流域潜在蒸散量时空变化特征[J].生态学杂志,2013,32(5):1292-1302.
WANG Q, ZHANG M J, PAN S K, et al. Spatiotemporal variation patterns of potential evapotranspiration in the Yangtze River basin of China [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2013, 32(5): 1292-1302. (in Chinese)
- [16] 代海燕,梁显丽,宝秋利,等.近46年毛乌素沙地和科尔沁沙地潜在蒸散量的变化特征及影响因子分析[J].西北林学院学报,2019,34(2):8-13.
DAI H Y, LIANG X L, BAO Q L, et al. Variation characteristics and influencing factors of potential evapotranspiration in Mu Us and Khorchin Sandy land in recent 46 years [J]. *Journal of Northwest Forestry University*, 2019, 34(2): 8-13. (in Chinese)

(下转第96页)

人民出版社,1979.

- [10] 黄正秋,张万儒,黄雨霖.年珠林场杉木人工林立地分类与评价的研究[J].林业科学,1989,2(3):286-290.
- [11] 刘财富,常新东,梁玉堂,等.辽宁省刺槐人工林立地质量评价的研究[J].吉林林学院学报,1998,14(2):74-80.
- [12] 倪志云,陆贵巧,张锁成,等.河北省山区核桃立地质量评价研究[J].河北林果研究,2006,21(1):53-56.
- [13] 李正茂,李昌珠,张良波,等.油料树种光皮树人工林立地质量评价[J].中南林业科技大学学报,2010,30(3):75-79.
- LI Z M, LI C Z, ZHANG L B, et al. Evaluation of *Cornus wilsoniana* plantation site quality[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology, 2010, 30(3): 75-79. (in Chinese)
- [14] 郭艳荣,刘洋,吴保国.福建省宜林地立地质量的分级与数量化评价[J].东北林业大学学报,2014,42(10):54-59.
- GUO Y R, LIU Y, WU B G. Evaluating dividing rank and quantification of site quality of suitable land for forest in Fujian Province[J]. Journal of Northeast Forestry University, 2014, 42(10): 54-59. (in Chinese)
- [15] 惠淑荣,李丽锋,刘强,等.辽东地区日本落叶松立地分类和立地质量研究[J].西北林学院学报,2011,26(3):139-142.
- HUI S R, LI L F, LIU Q, et al. Analysis of site condition and quality of *Larix kaempferi* in eastern Liaoning Province[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2011, 26(3): 139-142. (in Chinese)
- [16] 杜健,梁坤南,周再知,等.云南西双版纳柚木人工林立地类型划分及评价[J].林业科学,2016,52(9):1-10.
- DU J, LIANG K N, ZHOU Z Z, et al. Site classification and evaluation of teak plantation in Xishuangbanna, Yunnan Province, China[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2016, 52(9): 1-10. (in Chinese)
- [17] 唐诚,王春胜,庞圣江,等.广西大青山西南桦人工林立地类型划分及评价[J].西北林学院学报,2018,33(4):52-57.
- TANG C, WANG C S, PANG S J, et al. Site classification and evaluation of *Betula alnoides* plantations at Guangxi Daqing Mountain [J]. Journal of Northwest Forestry University, 2018, 33(4): 52-57. (in Chinese)
- [18] 李红盛,汪阳东,陈益存,等.山苍子生长经济性状遗传变异分析及优良家系选择[J].经济林研究,2017,35(4):64-71.
- [19] 王旭,杨关锋.我国山苍子开发利用的现状与发展对策[J].经济林研究,2010,28(3):136-139.
- [20] 李贤伟,李守剑,张健,等.四川盆周西缘水杉人工林立地质量评价研究[J].四川农业大学学报,2002,20(2):106-109.
- [21] 黄国胜,马炜,王雪军,等.基于一类清查数据的福建省立地质量评价技术[J].北京林业大学学报,2014,36(3):1-8.
- HUANG G S, MA W, WANG X J, et al. Forestland site quality evaluation of Fujian Province based on continuous forest inventory data[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2014, 36(3): 1-8. (in Chinese)
- [22] 陈世新.隆林县油茶林立地分类与立地质量评价[D].长沙:中南林业科技大学,2018.

(上接第 28 页)

- [17] 董旭光,顾伟宗,王静,等.影响山东参考作物蒸散量变化的气象因素定量分析[J].自然资源学报,2015,30(5):810-823.
- DONG X G, GU W Z, WANG J, et al. Quantitative analysis of climate factors for potential evapotranspiration changes in Shandong[J]. Journal of Natural Resources, 2015, 30(5): 810-823. (in Chinese)
- [18] 郑亚云.榆林 NDVI 时空变化及驱动因子研究[D].西安:长安大学,2015.
- [19] 张晓东.基于遥感和 GIS 的宁夏盐池县地质灾害风险评价研究[D].北京:中国地质大学,2018.
- [20] 刘瑾莹.宁夏中卫市沙坡头区地质灾害调查与评价[D].北京:中国地质大学,2018.
- [21] 任朝霞,杨达源.近 50a 西北干旱半干旱区气温分区及其变化趋势研究[J].干旱区资源与环境,2006,20(1):99-103.
- [22] 陈少勇,张康林,邢晓宾,等.中国西北地区近 47a 日照时数的气候变化特征[J].自然资源学报,2010,25(7):1142-1152.
- [23] 张强,胡隐樵,曹晓彦,等.论西北干旱气候的若干问题[J].中国沙漠,2000,20(4):357-362.
- ZHANG Q, HU Y Q, CAO X Y, et al. On some problems of arid climate system of northwest China[J]. Journal of Desert Research, 2000, 20(4): 357-362. (in Chinese)
- [24] 谭娇,丁建丽,董煜,等.新疆艾比湖绿洲潜在蒸散量年代际变化特征[J].农业工程学报,2017,33(5):151-156.
- TIAN J, DING J L, DONG Y, et al. Decadal variation of potential evapotranspiration in Ebinur Lake oasis of Xinjiang [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2017, 33(5): 151-156. (in Chinese)
- [25] 王幼奇,樊军,邵明,等.黄土高原地区近 50 年参考作物蒸散量变化特征[J].农业工程学报,2008,24(9):6-10.
- [26] 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.
- AN B, XIAO W W. Spatial and temporal variations of potential evapotranspiration in Shaanxi Province and the quantification of the causes from 1955 to 2015[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2018, 25(4): 146-151. (in Chinese)
- [27] 佟玲,康绍忠,粟晓玲.石羊河流域气候变化对参考作物蒸发蒸腾量的影响[J].农业工程学报,2004,20(2):15-18.