

DOI: 10.20103/j.stxb.202211293445

陈林, 杨新国, 王磊, 宋乃平, 郑松, 吴梦瑶. 荒漠草原不同植物群落蒸散组分特征及其环境因子影响分析. 生态学报, 2024, 44(1): 330-342.

Chen L, Yang X G, Wang L, Song N P, Zheng S, Wu M Y. Characteristics of evapotranspiration components of different plant communities in desert steppe and its relationship with environmental factors. Acta Ecologica Sinica, 2024, 44(1): 330-342.

荒漠草原不同植物群落蒸散组分特征及其环境因子影响分析

陈 林^{1,2,3}, 杨新国^{1,2,3}, 王 磊^{1,2,3}, 宋乃平^{1,2,3,*}, 郑 松⁴, 吴梦瑶⁴

1 宁夏大学生态环境学院, 银川 750021

2 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, 银川 750021

3 宁夏大学西北退化生态系统恢复与重建教育部重点实验室, 银川 750021

4 宁夏大学农学院, 银川 750021

摘要: 蒸散发是生态水文过程的关键环节, 掌握蒸散组分的变化特征及其影响因子, 对于旱半干旱地区的可持续发展至关重要。以荒漠草原多年生植物针茅群落和一年生植物猪毛蒿群落为研究对象, 利用小型蒸渗仪开展了连续 3 年监测, 分析了蒸散组分的日、月和年变化规律, 探讨了影响蒸散组分的主要环境因子。结果表明: 晴天时, 多年生和一年生植物群落蒸散组分呈先增加后减小的抛物线型, 夜间蒸散活动较弱, 累积蒸散量较低, 不足全天总累积蒸散量的 20%; 阴天时各蒸散组分无明显峰值, 且日累积量均较小, 一年生和多年生植物群落的蒸散量、蒸发量和蒸腾量无显著差异; 10.64 mm/d 及以上降雨对蒸散和蒸发的日变化具有明显影响, 随着降雨量的增多, 蒸散量和蒸发量也呈增大趋势, 但蒸腾量则相对较小。从月动态来看, 7—9 月占全年蒸散量和蒸发量的一半左右, 冬春季蒸散量和蒸发量维持在全年最低水平。年蒸散量与年降雨量接近, 而蒸腾量占蒸散量的比例低于 10%。总体来看, 多年生植物群落蒸散量较一年生植物群落多。采用 Mantel 检验方法分析不同时间尺度影响蒸散组分的主要气候因素, 在小时尺度上太阳辐射与蒸发量和蒸腾量显著性水平较高 ($P < 0.01$), 但相关性较低 ($r < 0.2$); 在日尺度上, 蒸散量、蒸发量和蒸腾量与降雨量的显著性 ($P < 0.01$) 和相关性 ($r \geq 0.4$) 均最高; 而月尺度上, 降雨量和降雨速率与蒸散量、蒸发量的相关性较高 ($0.2 \leq r < 0.4$), 但显著性较低 ($P \geq 0.05$)。因此, 蒸散组分受环境因子的影响在不同时间尺度上具有较大差异, 说明蒸散组分受多种因子共同影响。

关键词: 荒漠草原, 蒸散组分, 时间尺度, 环境因子, Mantel 检验

Characteristics of evapotranspiration components of different plant communities in desert steppe and its relationship with environmental factors

CHEN Lin^{1,2,3}, YANG Xinguo^{1,2,3}, WANG Lei^{1,2,3}, SONG Naiping^{1,2,3,*}, ZHENG Song⁴, WU Mengyao⁴

1 College of Ecology and Environment, Ningxia University, Yinchuan 750021, China

2 Breeding Base for State Key Laboratory of Land Degradation and Ecological Restoration in Northwest China (Ningxia University), Yinchuan 750021, China

3 Key Laboratory of Restoration and Reconstruction of Degraded Ecosystem in Northwest China (Ningxia University), Ministry of Education, Yinchuan 750021, China

4 College of Agriculture, Ningxia University, Yinchuan 750021, China

Abstract: Evapotranspiration is a key link of eco-hydrological process. It is very important for the sustainable development

基金项目: 宁夏重点研发计划项目 (2019BFG02022, 2021BEG02005); 国家自然科学基金 (31960359); 第三批宁夏青年科技人才托举工程项目 (TJGC2018068)

收稿日期: 2022-11-29; **网络出版日期:** 2023-10-12

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: songnp@163.com

of arid and semi-arid areas to master the variation characteristics of evapotranspiration components and its main influencing factors. In this study, perennial (*Stipa capillata*) and annual (*Artemisia. scoparia*) plant communities in desert steppe of Ningxia Hui Autonomous Region were taken as the research objects and the small lysimeters were used to monitor the evapotranspiration for three years. The diurnal, monthly, and annual changes of evapotranspiration components were analyzed, and the main environmental factors affecting evapotranspiration components were discussed. The results showed that on sunny days, the evapotranspiration components of perennial and annual plant communities were parabolic, which firstly increased and then decreased. The nighttime evapotranspiration activity is weak, and the accumulated evapotranspiration is low, less than 20% of the total accumulated evapotranspiration for the whole day. There were no significant peaks for each evapotranspiration component during cloudy days, and all daily accumulations were small, with no significant differences in evapotranspiration, evapotranspiration and transpiration between the annual and perennial plant communities. The daily variation of evapotranspiration and evapotranspiration was significantly influenced by rainfall of 10.64 mm/d and above, and the trend of evapotranspiration and evapotranspiration increased with the increase of rainfall, but the transpiration was relatively small. In terms of monthly dynamics, evapotranspiration and evaporation are greater from July to September, accounting for about half of the year. And the evapotranspiration and evapotranspiration are maintained at the lowest level throughout the year in winter and spring. The annual evapotranspiration was closed to the annual rainfall, and the three-year average ratio of plant transpiration to evapotranspiration was less than 10%. In general, the evapotranspiration of perennial plant communities was higher than that of annual plant communities. The Mantel test was used to analyze the main climatic factors affecting evapotranspiration components at different time scales. It was found that solar radiation had a high level of significance with evaporation and transpiration on hourly scale ($P < 0.01$), but a low correlation ($r < 0.2$). On the daily scale, evapotranspiration, evapotranspiration and evapotranspiration had the highest significance ($P < 0.01$) and correlation ($r \geq 0.4$) with rainfall. While on the monthly scale, the correlations of rainfall and rainfall rate with evapotranspiration and evapotranspiration were higher ($0.2 \leq r < 0.4$) but less significant ($P \geq 0.05$). Therefore, the influence of evapotranspiration components by environmental factors has a large variation in different time scales, indicating that evapotranspiration components were influenced by a combination of factors.

Key Words: desert steppe; evapotranspiration component; time scale; environmental factor; Mantel test

水分是植被恢复和生长中最重要的限制因子之一,决定着植被-土壤系统的可持续性和稳定性^[1],往往会影响植被恢复和生态重建的效果,特别是在干旱半干旱地区的荒漠草原,水分供给是制约植被生理生态过程的主要因素^[2-4]。干旱环境中生态系统的水文过程和植被生产力可能比潮湿环境中的生态系统更容易受到气候变化的影响^[5],近年来,水分短缺对生态系统结构和功能的不利影响日益加重^[6],荒漠草原具有典型的过渡性和脆弱性,对水分变化的影响更为敏感。降雨作为荒漠草原大部分地区水分的唯一来源,不仅影响着植被分布,还决定了草地生态系统的结构和功能^[7]。因此水分的合理管理与利用成为荒漠草原生态系统可持续发展面临的重要挑战之一。

蒸散包括了植物蒸腾和土壤蒸发两个组分,是降雨转化的主要“出口”,频繁参与下垫面和大气之间的水汽交换,作为联系土壤-植被-大气连续体水分传输的重要环节,是水循环和水资源研究的重要内容^[8],已成为许多学科的研究热点^[9]。植物生长过程中蒸腾是水分的必要消耗,而土壤蒸发不参与植物生长过程,一般认为是水分的无效散失。但土壤蒸发会影响植被的水分利用,特别是在缺水的干旱半干旱地区,量化土壤蒸发对植被建设极其重要^[10]。因此,准确测定蒸散组分对于揭示水分收支状况具有重要意义。基于水量平衡原理的称重式蒸渗仪通过测定蒸渗仪内土柱的质量变化计算水分收支,是直接测定蒸散量的主要方法,具有较高的准确性和时间分辨率,常被认为是测定蒸散量的“黄金标准”方法^[11],可以校正和检验其他蒸散测定和模拟结果^[11-12]。

目前,不同时间尺度蒸散发的探讨多集中在农田、森林、湿地等生态系统,对荒漠草原不同植物群落蒸散发特征的研究相对较少。基于此,本文以宁夏荒漠草原为研究区域,采用小型蒸渗仪,开展天然草地不同植物群落蒸散耗水特征的连续监测,研究不同时间尺度蒸散发特征,有助于深入了解荒漠草原水分耗散过程和土壤水分消耗特征,期望研究结果为蒸散发模拟与时间尺度转换模型奠定基础,并为今后荒漠草原水资源评价、生态恢复过程管理提供数据支撑。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究地点位于宁夏回族自治区盐池县皖记沟行政村的宁夏大学西北退化生态系统恢复与重建教育部重点实验室——退化生态系统监测与试验基地。年降雨量小、时空分布不均,年际变率大,多以小雨的形式为主^[13],属典型的中温带大陆性气候^[14]。土壤类型主要为风沙土和灰钙土。所选样地植物群落以一年生植物猪毛蒿(*Artemisia. scoparia*)和多年生植物针茅(*Stipa capillata*)为主。

1.2 试验设计和数据采集

2018年3月,在所选固定监测样地内,布设4个小型称重式蒸渗仪(LYS40)测定不同植物群落蒸散量,其中多年生植物为针茅,一年生植物为猪毛蒿。供试蒸渗仪(LYS40-2)直径40 cm、高度50 cm、蒸发分辨率和渗漏分辨率均为0.04 mm。渗漏水由自动排水泵排出,排水系统仅在规定的时间内进行,避免排水时扰动称量传感器的精确测量。蒸渗仪的测量筒内原状土体采用切削加压法套制,移栽的主要植物密度与监测点周围草地相一致,监测期内植物生长良好。在西北干旱地区降雨量小而蒸发量大的条件下,小型蒸渗仪测定土壤蒸发是可行和准确的^[15],因此本研究所选土壤棵间蒸发仪(LYS40-1)与蒸渗仪规格相同,两者共用一个数据采集器,但测量筒内无移植植物,并及时清除萌发的幼苗。每30 min记录一次土柱重量,并不定期的用标准砝码(500 g)校准称量系统,以防止金属蠕变等设备原因产生的误差影响测量精度。此外,蒸渗仪测量数据的准确性是研究的关键^[12],因此,为保证数据可靠,排除因安装过程对土壤扰动的影响,在仪器安装一个月后采集数据并进行相关分析。利用布置在蒸渗仪附近的自动气象站(Weather Station Vantage Pro2™ Plus)采集草地上蒸散主要的气象驱动力:降雨量、空气温度、太阳辐射、风速等环境因子,采样频率与蒸渗仪一致,均为30 min。期间由于设备损坏,缺失了部分时间段的数据,在分析与蒸散组分的关系时,同步删除对应缺失时间段的蒸散组分数据,然后进行相关分析。以上数据采集时间均为2018年4月1日至2021年3月31日。

1.3 数据分析

1.3.1 蒸散组分计算

日累积蒸散量为每天0:00—24:00数据累加。为确保数据质量,当遇到下述情况时,蒸渗仪的观测数据被剔除以减少观测误差和系统误差:(1)明显超出各通量物理含义的数据;(2)数据质量监控指标异常时的数据;(3)大风、动物等造成异常的数据。

根据水量平衡原理,蒸渗仪监测的蒸散量(ET)计算公式为:

$$ET = P - Q - \Delta S - R$$

$$\Delta S = 10 \times \frac{\Delta W / \rho}{\pi (D/2)^2}$$

式中, ET 为蒸散量(mm); P 为降雨量(mm); Q 为渗漏量(mm); ΔS 为蒸渗仪监测土壤水的变化量(mm); R 为地表径流量(mm); ΔW 为每两次测定重量差值(g),实际还包含了汽态凝结水量(多发生在夜间)^[16]; ρ 为降雨密度,一般设定为 1 g/cm^3 ; D 为微型蒸渗仪直径(cm)。研究区地势平坦,多以小降雨事件为主,且降雨强度较小^[17], R 忽略不计,即 $R=0$ 。土壤蒸发量(E)则采用土壤棵间蒸发仪所测得的数据,其计算公式和蒸散量一致。

干旱半干旱地区冠层截留蒸发占总蒸散量的比例较低,往往忽略不计^[18-19]。因此,其蒸散组分多以双源

结构(植物蒸腾和土壤蒸发)进行分析^[20]。植物蒸腾(T , mm)则由蒸散量(ET)与土壤蒸发量(E)的差值得出,计算公式为: $T = ET - E$ 。

1.3.2 Mantel 检验分析

Mantel 检验是控制了第三个距离矩阵的效应后来检验两个距离矩阵间的相关性^[21],已被广泛用于生态学众多研究内容中^[22]。以蒸散量、蒸发量和蒸腾量为一矩阵,采用 Mantel-Test 方法分析蒸散组分与气候和土壤因子矩阵的相关性。为消除环境因子与蒸散组分单位差异的影响,保证同等对待每维特征,在分析前先对所有数据进行非负实数的平方根转换标准化后,采用 R Studio 软件绘制 Mantel Test 结果。当 Mantel's r 值 < 0.2 时,表明两个矩阵相关性较低,当 Mantel's r 值在 $0.2—0.4$ 时,表明两矩阵仅有部分重合,重合度相对较高,当 Mantel's r 值在 ≥ 0.4 时,表明两矩阵大部分重合,重合度最高;统计检验水平 Mantel's $P < 0.01$ 时, Mantel's r 值越高,两矩阵相关性越强^[23],反之亦然。

2 结果与分析

2.1 气候因子变化特征

图 1 为研究期内日均温。一般将日均温度大于 0°C 的时期记为一年之中的暖期,小于 0°C 的时期则记为一年之中的冷期。可以看出,研究区 4—10 月为暖期,为期 7 个月,而 11 月至次年 3 月为 5 个月的冷期。监测期内日平均气温为 9.75°C ,最高值是 29.27°C ,最低值为 -16.82°C 。气温具有明显的月动态差异。1 月份气温达到最低值,月平均为 -6.30°C ,从 3 月开始,气温呈现上升趋势,到 5 月日均温 $> 10^{\circ}\text{C}$,植物开始萌发生长,在 7 月份达到最高值,平均日气温为 23.57°C 。之后,气温呈下降趋势。而年际间气温差异不大。

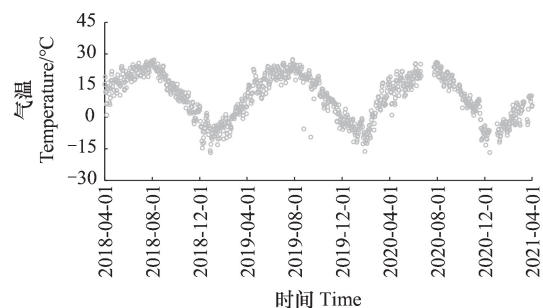


图 1 2018—2021 年研究区日均温变化

Fig.1 Changes of average daily temperature in research area from 2018 to 2021

图 2 为日降雨量和平均降雨强度。2018 年 4 月至 2019 年 3 月总降雨量为 137.97 mm,属于枯水年。其中,5—9 月降雨量 115.40 mm,占全年总降雨量的 83.64%。发生降雨事件共有 56 d,最大日降雨量为 26.00 mm,最小日降雨量 0.20 mm,降雨发生日平均降雨量仅为 2.46 mm。2019 年 4 月至 2020 年 3 月总降雨量为 354.66 mm(5—9 月降雨量 302.72 mm,占全年总降雨量的 85.36%),属于丰水年。共有 63 d 发生降雨事件,2019 年 5 月 18 日降雨量高达 90.20 mm,达到了暴雨级别,降雨发生日平均降雨量为 5.63 mm。2020 年 4 月

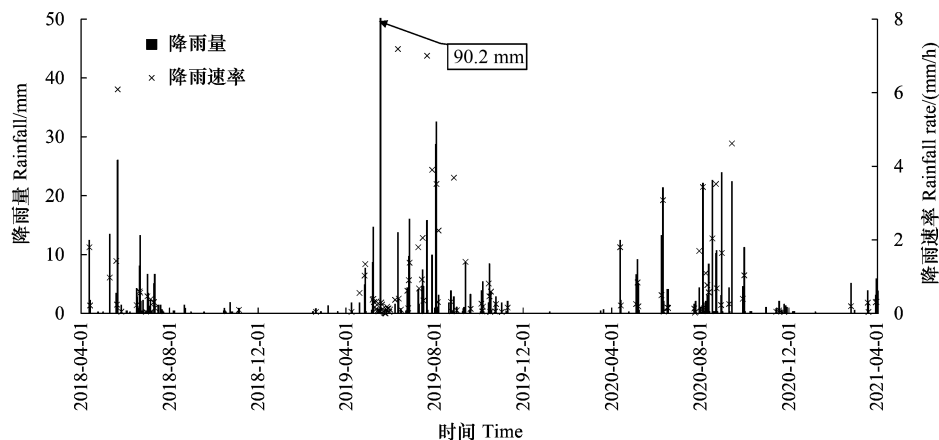


图 2 2018—2021 年研究区降雨量和降雨强度变化

Fig.2 Changes of rainfall and rainfall rate in research area from 2018 to 2021

至 2021 年 3 月总降雨量为 274.29 mm (5—9 月降雨量 229.51 mm, 占全年总降雨量的 83.67%), 属于平水年。发生降雨事件的 63 天中, 最大日降雨量为 23.87 mm, 最小日降雨量 0.20 mm, 降雨发生日平均降雨量为 4.35 mm。从降雨速率来看, 最大降雨速率发生在 2019 年 8 月 2 日, 达到了 8.18 mm/h, 但平均降雨速率仅为 0.84 mm/h。

太阳辐射直接影响植物的光合作用, 太阳辐射强度增加, 植物的光合作用及蒸腾速率增加^[24]。研究区太阳辐射日平均值为 187.57 W/m^2 , 但受云量变化的影响, 其日变化幅度较大(图 3)。太阳辐射具有明显的月动态变化, 5—9 月太阳辐射日平均值最高, 大于 220.00 W/m^2 , 12 月—次年 2 月太阳辐射日均值小于 120.00 W/m^2 , 为全年最低值。

取一天 24 小时每 30 min 的风速求平均作为日平均风速(灰色)。日平均风速分布在 $0.03\text{—}5.68 \text{ m/s}$ 范围内(图 4), 平均为 1.54 m/s , 日最大风速为 5.68 m/s 。低风速($\leq 1.00 \text{ m/s}$)天数占有记录天数的 30.43%。同时, 本研究取风速 7 日(红色)和 30 日(黑色)平均值以降低随机性来探讨风速的特征。但总体看来, 风速的日平均、7 日移动平均和 30 日移动平均值风速变化较大, 并没有明显的规律。这与风是自然界中随机变化最大的气象要素之一有关^[25]。

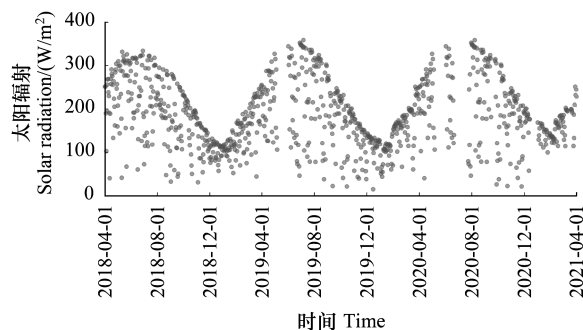


图 3 2018—2021 年研究区太阳辐射变化

Fig. 3 Changes of solar radiation in research area from 2018 to 2021

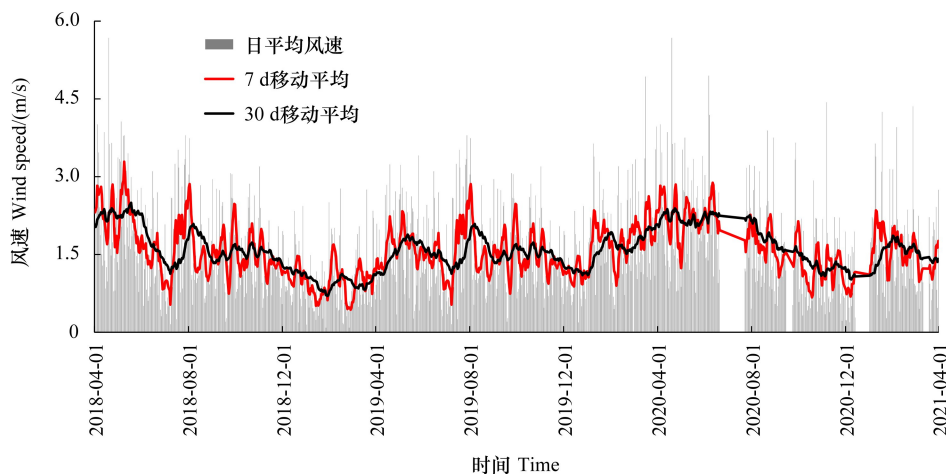


图 4 2018—2021 年研究区风速变化

Fig. 4 Changes of wind speed in research area from 2018 to 2021

2.2 典型天气蒸散组分日动态特征

2.2.1 典型晴天

选择植物生长期作为典型晴天的观测资料, 探讨荒漠草原不同蒸散组分的日变化特征。从图 5 中可以看出, 一年生植物和多年生植物的蒸散量、蒸发量和蒸腾量的日变化均为先增加后减小的抛物线型, 最高值出现在 12:00—14:00 左右。一年生植物群落中, 2018 年 7 月 22 日、8 月 24 日和 9 月 29 日累积蒸散量分别为 3.26 mm/d 、 1.83 mm/d 、 1.31 mm/d , 日累积蒸发量分别为 1.51 mm/d 、 0.88 mm/d 、 0.92 mm/d , 日累积蒸腾量分别为 1.75 mm/d 、 0.96 mm/d 、 0.40 mm/d ; 多年生植物日累积蒸散量在 7—9 月间分别为 2.83 mm/d 、 3.22 mm/d 、 2.59 mm/d , 日累积蒸发量分别为 2.55 mm/d 、 1.79 mm/d 、 1.35 mm/d , 日累积蒸腾量分别为 0.28 mm/d 、 1.43 mm/d 、

1.23 mm/d。夜间(20:00 至次日 6:00)蒸散活动较弱,累积蒸散量较低,半小时平均蒸散量不足 0.10 mm,该时段累积蒸散量不足全日总累积蒸散量的 20%。而且夜间蒸散组分常有正负波动,可能与晚上温度降低使水汽凝结进而对蒸渗仪的测量产生影响有关^[16, 26]。

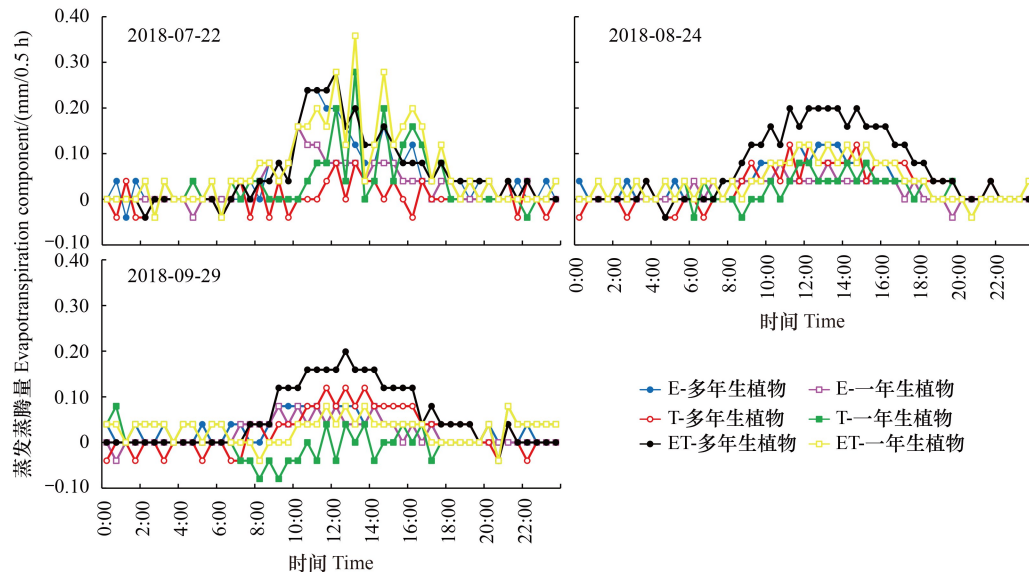


图 5 典型晴天荒漠草原蒸散、蒸腾和蒸发日变化

Fig.5 Daily variation of evapotranspiration, transpiration and evaporation at typical sunny day in desert steppe

E: 蒸发量 Evaporation; T: 蒸腾量 Transpiration; ET: 蒸散量 Evapotranspiration

2.2.2 典型阴天

研究区光照充足,完全无日照且无降雨的时间段较少,经过筛选,将 2020 年 7 月 29 日、8 月 16 日和 9 月 27 日作为三个典型阴天,分析其蒸散组分的日变化特征。从图 6 可以看出,阴天时各蒸散组分变化量均较低,半小时变化量分布在 -0.16—0.16 mm 的范围内,且无明显的峰值。7 月份日累积蒸散量分别是 0.32 mm/d 和

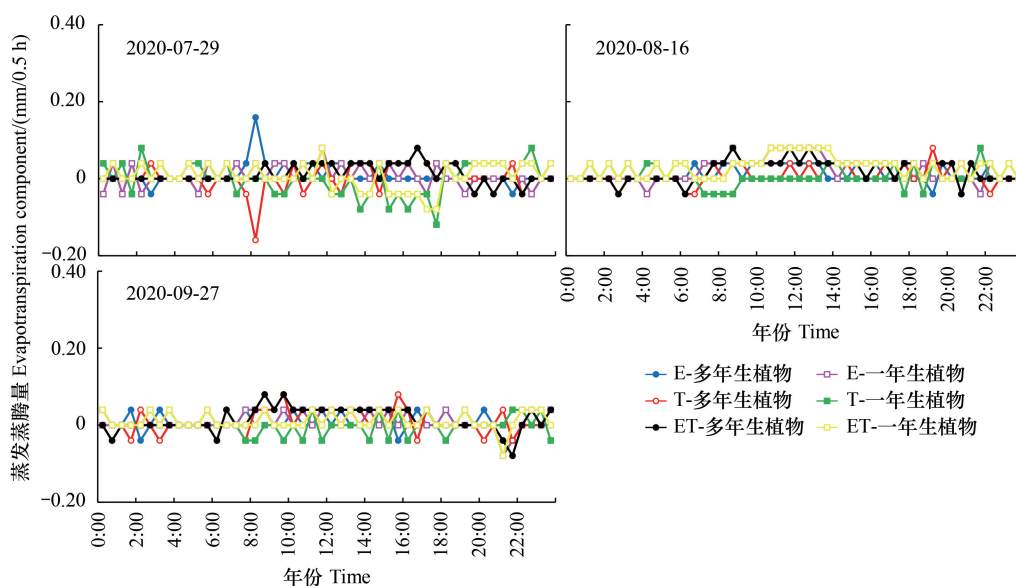


图 6 典型阴天荒漠草原蒸散、蒸腾和蒸发日变化

Fig.6 Daily variation of evapotranspiration, transpiration and evaporation at typical cloudy day in desert steppe

0.52 mm/d, 日累积蒸发量分别为 0.31 mm/d 和 0.40 mm/d, 日累积蒸腾量分别为 0.01 mm/d 和 0.12 mm/d; 8 月份一年生植物和多年生植物群落日累积蒸散量分别是 1.47 mm/d 和 0.96 mm/d, 日累积蒸发量分别为 1.11 mm/d 和 0.60 mm/d, 日累积蒸腾量均为 0.36 mm/d; 9 月份日累积蒸散量分别是 0.52 mm/d 和 0.72 mm/d, 日累积蒸发量分别为 0.44 mm/d 和 0.28 mm/d, 日累积蒸腾量分别为 0.08 mm/d 和 0.44 mm/d。一年生和多年生植物群落蒸散量、蒸发量和蒸腾量差异不显著。

2.2.3 典型雨天

根据本研究区的降雨特征, 划分三个等级的降雨观测数据进行分析, 分别是小降雨等级 (2018 年 9 月 29 日, 降雨量 6.6 mm)、中降雨等级 (2020 年 8 月 23 日, 降雨量 10.64 mm) 和大降雨等级 (2020 年 8 月 30 日, 降雨量 23.87 mm), 以探讨不同降雨条件下荒漠草原蒸散组分的日变化特征。从图 7 看出, 小降雨事件对蒸散组分变化量的影响较小, 多年生植物群落半小时蒸散变化量最大值不超过 0.20 mm, 而一年生植物群落变化量最大仅为 0.08 mm; 中降雨等级下多年生植物群落半小时最大变化量为 1.15 mm, 一年生植物的最大变化量为 1.19 mm; 当降雨量达到 23.87 mm 的大降雨等级时, 多年生植物群落蒸散和蒸发半小时最大变化量均达到了 1.75 mm, 一年生植物群落的蒸散和蒸发最大变化量为 1.67 mm。

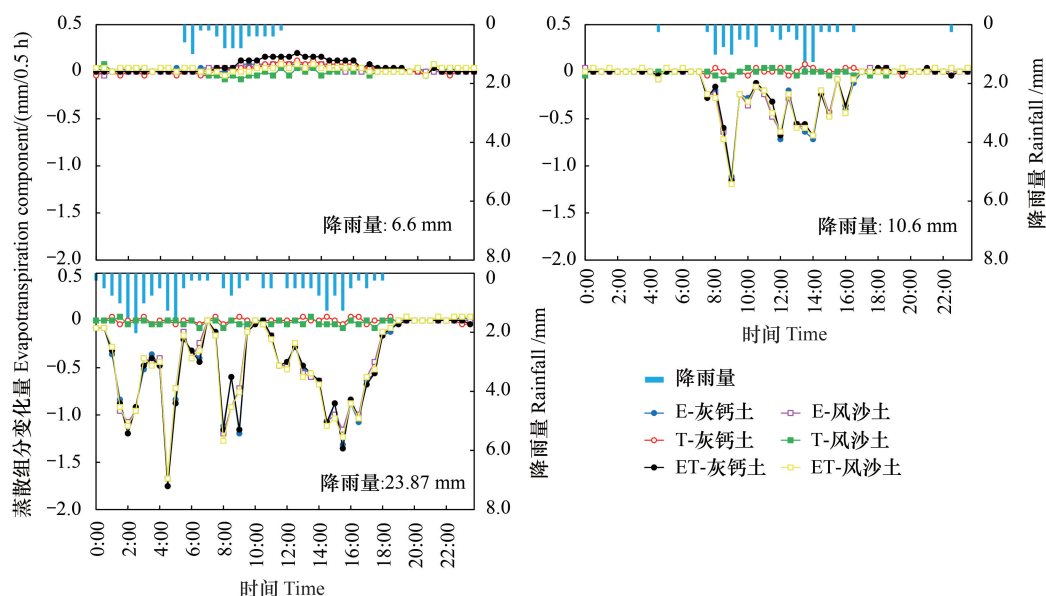


图 7 典型雨天荒漠草原蒸散、蒸腾和蒸发日变化

Fig.7 Daily variation of evapotranspiration, transpiration and evaporation at typical rainy day in desert steppe

从图 8 可以看出, 根据水量平衡公式, 小降雨等级下多年生植物群落的日累积蒸散量为 4.01 mm, 日累积蒸发量为 5.25 mm, 日累积蒸腾量为 -1.24 mm, 一年生植物的日累积蒸散量为 5.29 mm, 日累积蒸发量为 5.68 mm, 日累积蒸腾量为 -0.40 mm; 在中降雨等级, 多年生和一年生植物群落的日累积蒸散量分别为 17.93 mm 和 18.16 mm, 日累积蒸发量为 18.08 mm 和 18.24 mm, 而日累积蒸腾量为 -0.16 mm 和 -0.08 mm; 当达到大降雨等级时, 多年生植物群落的日累积蒸散量高达 45.21 mm, 日累积蒸发量为 45.13 mm, 日累积蒸腾量为 0.08 mm, 一年生植物的日累积蒸散量为 44.81 mm, 日累积蒸发量为 44.25 mm, 日累积蒸腾量为 0.56 mm。因此, 随着降雨量的增加, 计算得出的蒸散量和蒸发量也是增大的, 而蒸腾量几乎为 0, 甚至还有负值出现。说明蒸散量和蒸发量对降雨等级具有显著响应, 而蒸腾量则与实际植物耗水情况不相符, 这可能与在雨天会低估 3%—11% 的蒸散量有关^[5], 也可能与裸地相比, 植物的遮阴作用, 减少了蒸渗仪中的棵间土壤蒸发量, 而太阳辐射强度较弱的雨天, 植物蒸腾作用减弱, 两者叠加使得蒸散量较小。

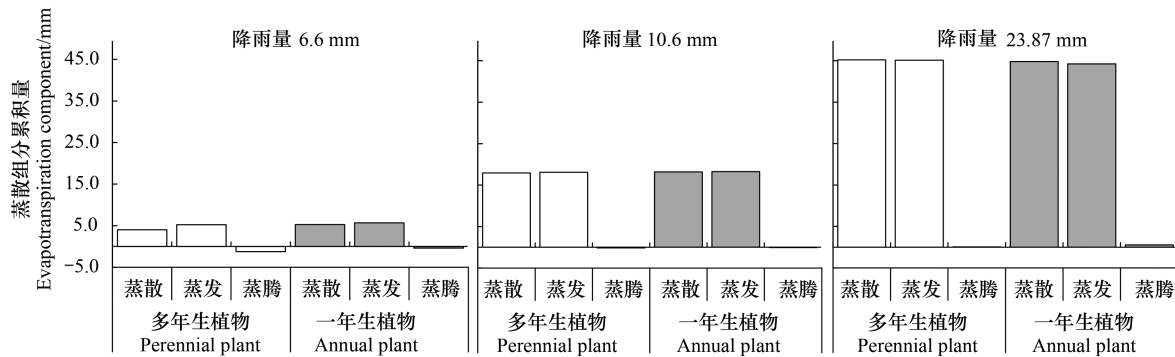


图8 典型雨天荒漠草原蒸散、蒸腾和蒸发日累积量

Fig.8 Daily cumulative quantity of evapotranspiration, transpiration and evaporation at typical rainy day in desert steppe

2.3 不同月份蒸散组分动态特征

根据蒸渗仪实测数据,结合水平平衡公式分析后得出的蒸散组分月动态(图9),可以看出蒸散和蒸发量在月际间呈先增后减的抛物线型,在月际间变化幅度较大。11月至次年3月份,由于气温较低,植物尚未萌发,蒸散作用较弱,且以土壤蒸发为主。4月份开始,随着气温回暖,植物生长,蒸腾作用叠加土壤蒸发,使得蒸散量逐渐增大,到8月份达到峰值。总体来看,7—9月蒸散和蒸发占全年总蒸散发量的比例较高,其中多年生植物群落三个月占全年蒸散量的47.19%,蒸发量占全年蒸发量的50.39%;一年生植物群落在7—9月的蒸散量和蒸发量也占全年的一半左右,分别是44.80%和52.91%。10月份之后气温逐渐降低,植物由生长旺盛期进入生长后期,蒸散量也大幅降低,一年生植物和多年生植物群落月平均蒸散量低于5 mm。总体看来,冬春季蒸散量和蒸发量维持在全年最低水平,与毛乌素裸沙丘的蒸发特征相一致^[27]。

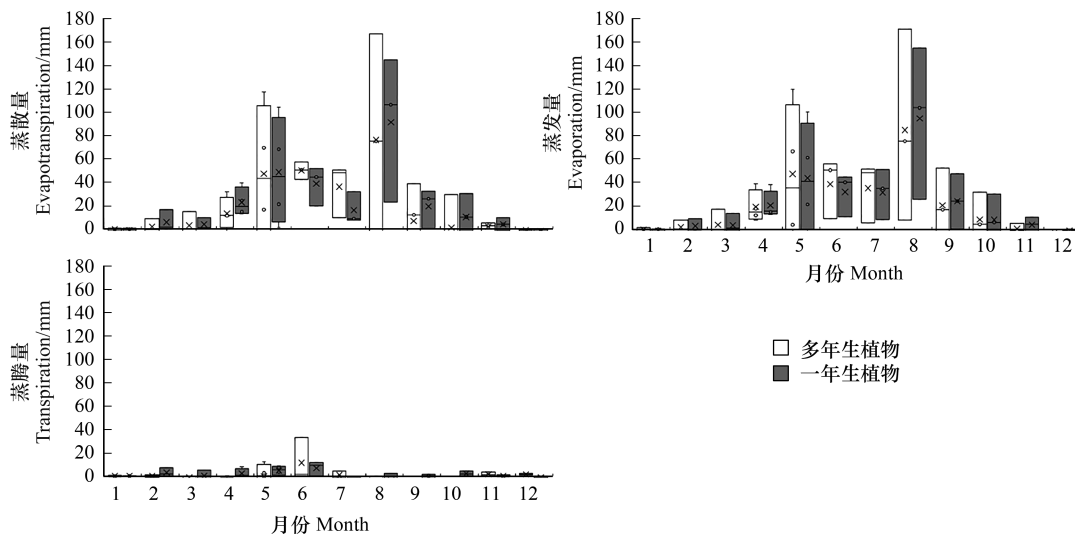


图9 荒漠草原蒸散、蒸腾和蒸发月变化

Fig.9 Daily variation of evapotranspiration, transpiration and evaporation in different months of desert steppe

2.4 年际间蒸散组分动态特征

从2018年4月—2019年3月(第一年)、2019年4月—2020年3月(第二年)和2020年4月—2021年3月(第三年)连续三年的蒸散组分可以看出(图10),多年生植物群落蒸散总量为814.53 mm,年平均蒸散量为271.51 mm;蒸发总量为739.37 mm,年平均蒸发量246.46 mm;蒸腾总量仅为75.16 mm,年平均蒸腾量为

25.05 mm。结合对应的降雨量分析,我们发现这与王伟娜等^[28]研究发现蒸渗仪测定的年蒸散量与年降雨量接近相一致。一年生植物群落的蒸散总量为 845.66 mm,年平均蒸散量为 281.89 mm;蒸发总量为 785.47 mm,年平均蒸发量 261.82 mm;蒸腾总量为 60.19 mm,年平均蒸腾量为 20.06 mm。其中 2019 年 4 月—2020 年 3 月间,多年生和一年生植物群落的蒸散量分别为 350.64 mm 和 380.02 mm,蒸发量为 340.49 mm 和 355.42 mm,均明显高于其他两个年份。2018 年 4 月—2019 年 3 月的蒸散量和蒸发量最低,多年生植物群落的蒸散量和蒸发量是 184.39 mm 和 136.10 mm,一年生植物群落的则分别为 159.07 mm 和 143.94 mm。多年生植物和一年生植物群落三年平均蒸腾量仅占蒸散总量的 9.23% 和 7.12%。

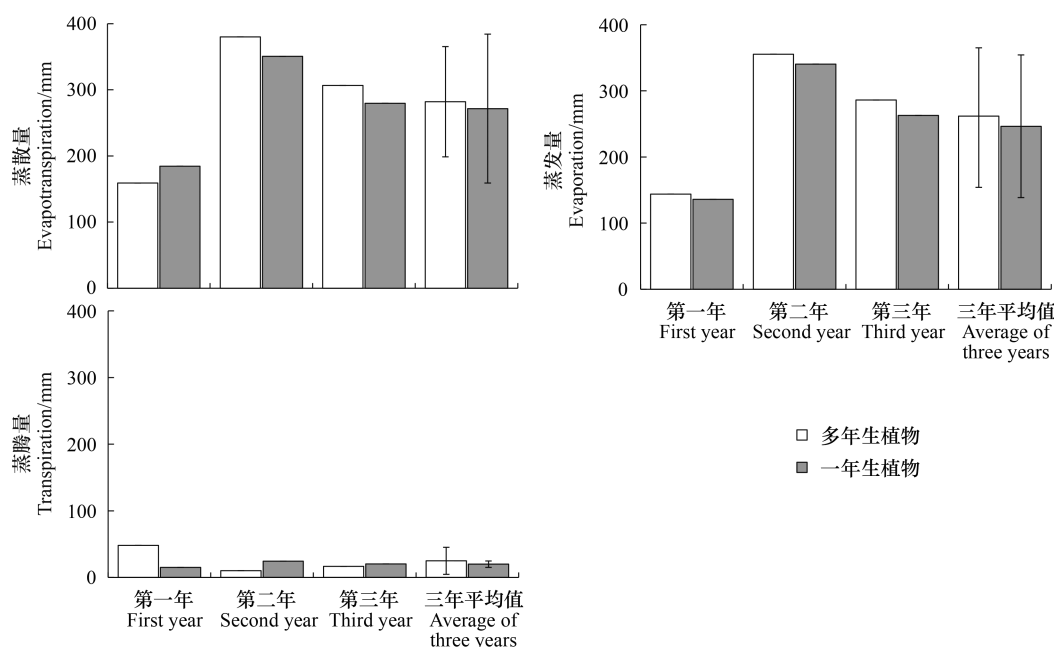


图 10 荒漠草原年蒸散量、蒸发量和蒸腾量

Fig.10 The annual evapotranspiration, evaporation and transpiration of desert steppe for three years

2.5 蒸散组分与影响因子的 Mantel-Test 分析

不同时间尺度下蒸散组分与气候、土壤因子间具有不同的相关性结果。小时尺度(图 11)来看,蒸散量和蒸发量与降雨量、降雨速率间的相关性较强($0.2 \leq r < 0.4$),但显著性水平较低($P \geq 0.05$);太阳辐射与蒸发量和蒸腾量的显著性较高($P < 0.01$),但相关性较低($r < 0.2$)。日尺度上(图 12),蒸散量、蒸发量和蒸腾量与降雨量的相关性($r \geq 0.4$)和显著性($P < 0.01$)均较高;降雨速率与蒸散量和蒸发量间的关系水平较显著($P < 0.05$);土壤含水量与蒸散量显著性较高($P < 0.01$);在日尺度上,风速、太阳辐射、气温和土壤温度对蒸散量、蒸发量和蒸腾量的影响较小($P \geq 0.05, r < 0.2$)。从月尺度(图 13)可以看出,降雨量和降雨速率与蒸散量、蒸发量的相关性较高($0.2 \leq r < 0.4$),但显著性较低($P \geq 0.05$);太阳辐射与蒸发量和蒸腾量的显著性相对较高($P < 0.01$),但相关性较低($r < 0.2$)。

3 讨论

3.1 蒸散组分特征

有研究发现,地表降雨量的 70% 会通过蒸散返回到大气中,干旱地区甚至可达到 90% 以上^[28],这与本研究发现蒸腾量仅占蒸散总量的 7.12%—9.23% 相一致。蒸腾量占蒸散量的比例很小,主要是因为荒漠草原植被覆盖度和生物量与农田、森林、典型草原等生态系统相比,其植物叶面积小、植被稀疏、生物量少,而光照充足、空气湿度较小、夏季气温较高,导致蒸发作用强烈。此外,还可能与在干旱半干旱区蒸渗仪(特别是在土

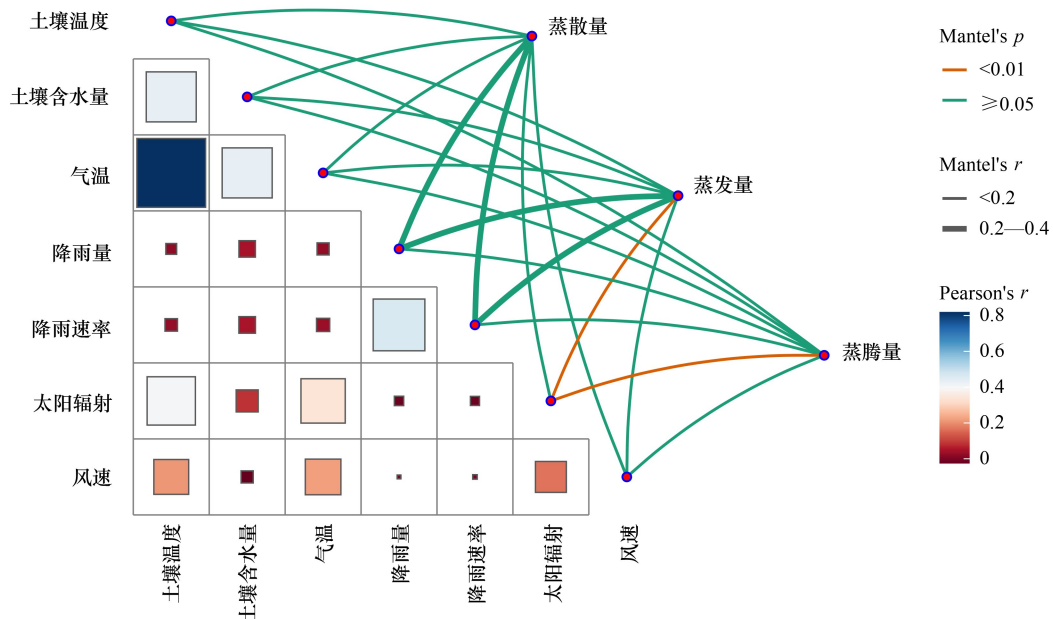


图 11 蒸散组分与气象土壤因子的小时尺度 Mantel-Test 分析

Fig.11 Mantel-Test analysis of evapotranspiration components and meteorological soil factors on the hourly scales

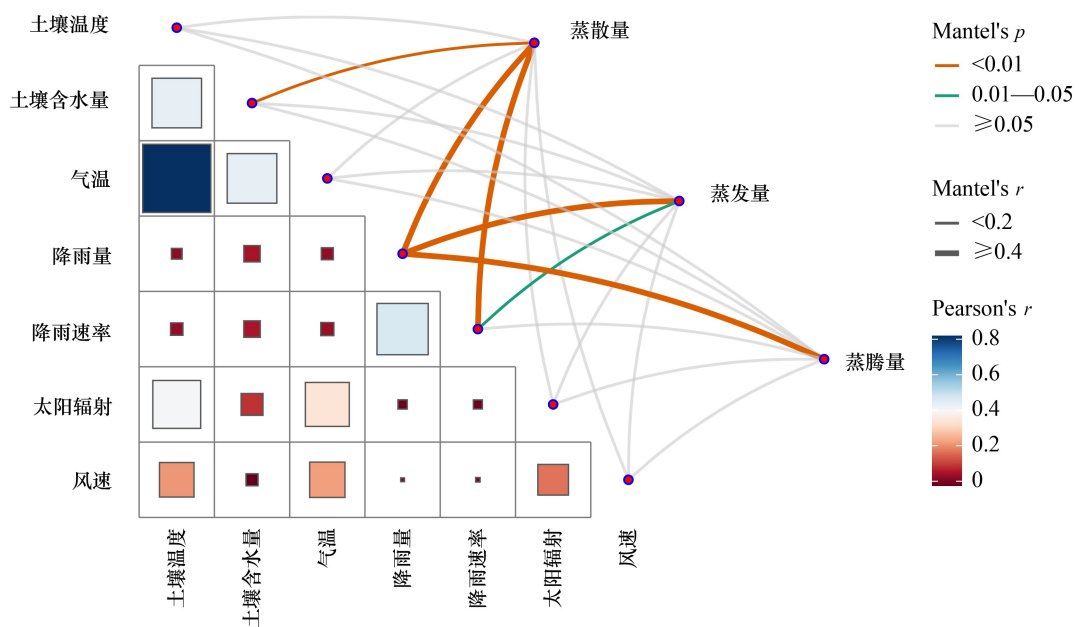


图 12 蒸散组分与气象土壤因子的日尺度 Mantel-Test 分析

Fig.12 Mantel-Test analysis of evapotranspiration components and meteorological soil factors on the daily scale

壤蒸发桶中)测定的降雨量要比雨量计观测的高^[10],加之非降雨性的水分(露、雾)能够被土壤和植被吸收^[29–30],这也影响了不同植被条件下蒸渗仪重量变化,是导致采用双源结构差值法得出蒸腾量较小(甚至出现负值)的主要原因。此外,土壤棵间蒸发仪由于缺少了植物的遮挡作用,土壤增温更快,导致蒸发量增大,对计算结果也产生了不可忽略的影响。因此,采用简单的双源结构差值法来分析植物蒸腾量还有待商榷,未来可以采用其他布设方式^[31]或利用同位素方法验证差值法,以便更合理地拆分蒸散发组分^[32]。

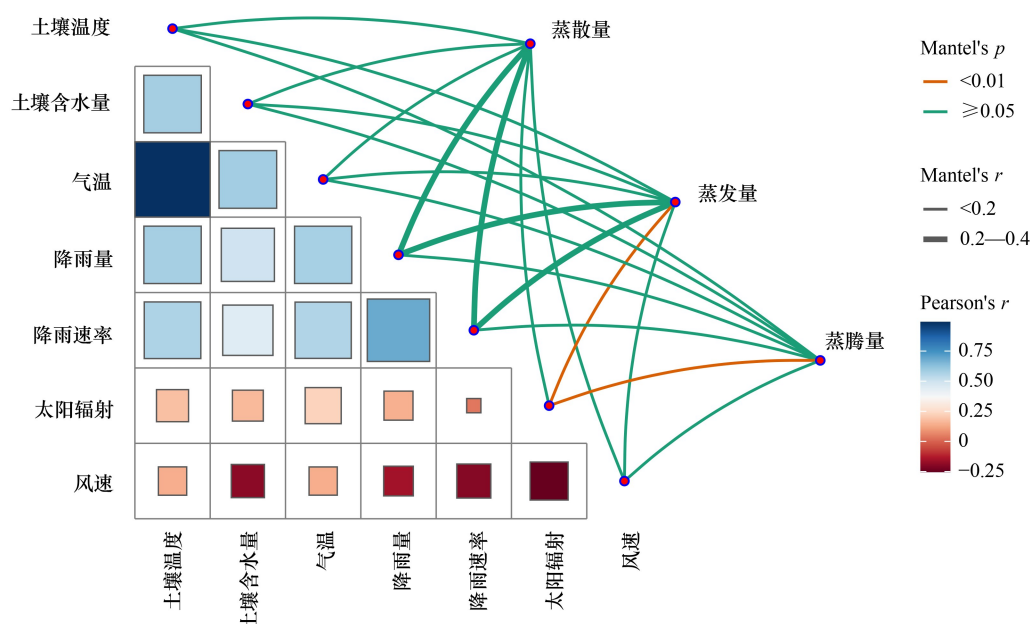


图 13 蒸散组分与气象土壤因子的月尺度 Mantel-Test 分析

Fig.13 Mantel-Test analysis of evapotranspiration components and meteorological soil factors on the monthly scale

3.2 蒸散组分主要影响因素

自然条件下,作为水循环的重要环节,蒸散受到气象因素变化的影响最为直接^[8, 33]。其中,太阳辐射是蒸散的主要驱动力,也是导致温度变化的主要因子^[28]。气温是通过影响植物的生理活动和植物叶面温度来影响蒸腾,而且冠层结构的时间和空间变化大,水分耗散的变异过程和原因均较复杂。Ahmadi 等^[34]研究发现,对于年尺度数据,太阳辐射是美国加利福尼亚州蒸散最有影响力的驱动因素;季节和月尺度上,水汽压则是夏季和春季的主要影响因素,而太阳辐射在较冷季节更为重要。在加州南圣华金河谷的果园,日蒸散量对净辐射最敏感,其次是地表温度和近地表温差^[35]。向下的短波辐射是太湖蒸发变化的主控因子,向下的长波辐射、气温、比湿也对湖泊蒸发年际变化有一定影响,但是风速对蒸发量的年际变化影响不大^[36]。可以利用饱和水汽压差、温度和空气相对湿度三个气象因子较好地模拟祁连山东段南麓青海云杉林日蒸腾过程^[37]。年蒸散变化的主导因子为相对湿度与风速,季尺度上春、秋季蒸散变化的主导因子为相对湿度,夏季为日照时数,而冬季则为风速^[38]。还有研究发现冠层气孔导度在日尺度上控制蒸发量和蒸散量的比例,叶面积指数的变化和大小解释了季节、年度和地点间变化,是最关键的因素^[5]。李谦等^[33]综合通径分析的结果认为,逐日尺度上影响稻田蒸散的主要因子为净辐射、相对湿度与最高气温,同时各气象因子间存在相互的制约、影响,最终对实际蒸散起到了综合性的作用效果。上述研究结果和结论间存在的差异既受到来自下垫面植被变异的影响,也受到蒸散数据空间观测尺度变化的影响。

虽然有较多的研究表明,风速对加大田间蒸散^[39]、加快植物蒸腾和棵间蒸发均具有一定作用,在亚热带南部季风区的太湖流域,风速在日尺度对稻田蒸散量的影响大于小时尺度^[12],但在半干旱大陆性季风区的北京,夏玉米地蒸散量则与净辐射的相关关系较好,但与空气湿度、温度和风速的相关关系随尺度变化而不同^[40]。这可能与所属气候类型区、下垫面条件不同导致蒸散特征有所差异。一天之中风速会随着时间而有大小变化,本研究中风速对蒸散组分的影响并不显著,可能与风速会对蒸渗仪产生一定影响有关,当施加在蒸渗仪的风压不均匀时,蒸渗仪称重系统表现出易变性^[28]而出现许多异常值^[10],还与取平均值后抵消了部分差异,进而导致与蒸散组分的相关性不高,这一点从小时尺度、日尺度和月尺度的相关性分析结果具有差异性也可以得到验证。

3.3 蒸散组分的尺度效应

蒸散量存在明显的时间尺度效应^[41],而且影响蒸散量的因素还受到时间尺度不同而有所差异。Baldocchi & Wilson^[42]以小时、天、季、年和十年时间尺度探讨了温带阔叶林蒸散量的各影响因素,并发现降雨量和气温是主要影响因素。孙树娇等^[43]以小时、日、旬、月尺度探究了青藏高原典型高寒荒漠的蒸散及水分消耗特征。刘笑吟等^[16]则利用自制小型蒸渗仪研究了小时和日尺度下稻田的蒸散量、水稻蒸腾量和土壤蒸发量特征,发现不同时间尺度影响因素不完全相同,而且影响程度也不一样。王军等^[44]通过连续 7 年的观测数据系统解析了荒漠草原生长季小时、日和月尺度上的蒸散特征,研究表明蒸散与风速、气温和降雨量保持高度相关。但贾晓鹏等^[10]对库布齐沙漠人工林研究发现土壤蒸发与降雨、气温、相对湿度、太阳辐射显著相关,而与风速不相关。周学雅等^[45]发现科尔沁草地土壤蒸发与饱和水汽压差、净辐射、风速显著相关,与气温显著不相关。有学者研究发现小时和月尺度上的经验方程可较好地反映内蒙古荒漠草原不同时间尺度下垫面蒸散特征^[44]。本研究中,蒸散量变化与气象因子间的关系同样存在时间尺度差异,相比于小时和月尺度,日尺度上各气象因子对实际蒸散量的影响效果更为明显。导致以上研究结果的差异可能与不同研究区的气象因子差异较大有关,同时也说明了不断变化的气象因子之间发生着错综复杂的作用。此外,也可能与所处的植被类型不同导致蒸散量有所差异^[46],说明蒸散受到气象、植物和土壤等多种因子的相互作用,共同作用影响着生态系统的水汽收支。刘国水等^[9]认为应依据空间尺度观测方法、下垫面状况和气候区条件来选择适宜的蒸散量时间尺度扩展方法。

受尺度效应影响,不同植物群落蒸散组分与其他影响因子间的相关性在不同时间尺度上具有较大的差异性,甚至出现了正负交替变化,这可能是尺度叠加造成的结果^[44],同时也说明蒸散组分的变化是多种因素共同影响和控制的结果,仅分析其中单个因素的影响规律,很难准确进行评价,不能完全弄清蒸散量、蒸腾量和蒸发量的控制机制^[16]。本研究仅探讨了气温、降雨、风速等气象因子和土壤温湿度对蒸散组分的影响,尚不能完全明确对蒸散发的调控机理,未来还需对多因素(如群落结构、叶面积指数、土壤理化性质等)的综合作用开展相关探讨,以明确荒漠草原蒸散组分所依赖的主控因子。

4 结论

(1)不同天气条件下(晴天、阴天和雨天)荒漠草原多年生和一年生植物群落蒸散量、蒸腾量和蒸发量差异较大。

(2)7—9月蒸散量和蒸发量占全年总蒸散量和蒸发量的比例较高(50%左右),而植物的蒸腾量占总蒸散耗水量的比例较低。一年生植物群落蒸散量低于多年生植物群落。

(3)气候和土壤因子对蒸散组分的影响具有时间尺度差异,在小时、日和月尺度上主要影响因子各不相同,说明多种因子共同影响和控制着蒸散组分,今后还需开展多因子综合作用的深入探讨。

参考文献(References):

- [1] 张志山,赵洋,张亚峰,杨昊天,虎瑞,霍建强,李新荣.中国北方沙区水量平衡自动模拟监测系统(沙坡头蒸渗仪群).中国科学院院刊,2021,36(6):733-743,755.
- [2] 林雍,陈智,杨萌,陈世苹,高艳红,刘冉,郝彦宾,辛晓平,周莉,于贵瑞.中国干旱半干旱区生态系统光合参数的时空变异及其影响因素.植物生态学报,2022,46(12):1461-1472.
- [3] 陈林,陈高路,宋乃平,李学斌,万红云,何文强.宁夏东部荒漠草原猪毛蒿光合特征和水分利用效率对降水变化的响应.草业学报,2022,31(10):87-98.
- [4] Ma Q H, Li Y B, Zhu Y, Liu X D, Yu H Y, Li L, Qi M, Sun H R, Yin Z T, Wang Y H, Zhang F, Zhou G S, Xu Z Z. Precipitation variations, rather than N deposition, determine plant ecophysiological traits in a desert steppe in Northern China. Ecological Indicators, 2022, 141: 109144.
- [5] Hu Z M, Yu G R, Zhou Y L, Sun X M, Li Y N, Shi P L, Wang Y F, Song X, Zheng Z M, Zhang L, Li S G. Partitioning of evapotranspiration and its controls in four grassland ecosystems: application of a two-source model. Agricultural and Forest Meteorology, 2009, 149(9): 1410-1420.
- [6] 姚远,刘瑞轩,张胜,韩清泉.林木蒸腾耗水量测算方法的比较与应用.应用生态学报,2021,32(8):2989-2998.
- [7] Bai X H, Zhao W W, Wang J, Santos Ferreira C S. Precipitation drives the floristic composition and diversity of temperate grasslands in China. Global Ecology and Conservation, 2021, 32: e01933.
- [8] 侯琼,王英舜,杨泽龙,师桂花.内蒙古典型草原作物系数的动态模拟与确定.植物生态学报,2010,34(12):1414-1423.

- [9] 刘国水, 许迪, 刘钰. 空间观测尺度差异对蒸散量时间尺度扩展方法估值的影响. 水利学报, 2012, 43(8): 999-1003.
- [10] 贾晓鹏, 马启民, 龙银平, 王海兵. 以中型蒸渗仪监测的库布齐沙漠人工林土壤蒸发量. 中国沙漠, 2022, 42(1): 211-222.
- [11] 袁小环, 杨学军, 陈超, 武菊英. 基于蒸渗仪实测的参考作物蒸散发模型北京地区适用性评价. 农业工程学报, 2014, 30(13): 104-110.
- [12] 刘笑吟, 王海明, 王钥, 周心怡, 徐俊增. 节水灌溉稻田蒸发蒸腾过程及其比例变化特征研究. 农业机械学报, 2021, 52(7): 271-282.
- [13] 陈林, 杨新国, 翟德苹, 宋乃平, 杨明秀, 候静. 柠条秸秆和地膜覆盖对土壤水分和玉米产量的影响. 农业工程学报, 2015, 31(2): 108-116.
- [14] 宋乃平, 王兴, 陈林, 薛毅, 陈娟, 随金明, 王磊, 杨新国. 荒漠草原“土岛”生境群落物种共存机制. 生物多样性, 2018, 26(7): 667-677.
- [15] 吴友杰, 杜太生. 西北干旱区农田土壤蒸发量及影响因子分析. 农业工程学报, 2020, 36(12): 110-116.
- [16] 刘笑吟, 王冠依, 杨士红, 徐俊增, 王乙江. 不同时间尺度节水灌溉水稻腾发量特征与影响因素分析. 农业机械学报, 2016, 47(8): 91-100, 170.
- [17] 陈林, 苏莹, 李月飞, 宋乃平, 王磊, 杨新国, 邱开阳, 刘波. 荒漠草原异质生境下猪毛蒿种群动态. 应用生态学报, 2019, 30(8): 2654-2666.
- [18] 魏宁宁, 母艳梅, 姜晓燕, 贾昕, 高圣杰, 蒋燕, 靳川, 韩聪, 查天山. 毛乌素沙地油蒿-杨柴灌丛生态系统蒸散组分分配及其影响因子. 应用生态学报, 2021, 32(7): 2407-2414.
- [19] Ji X B, Zhao W Z, Kang E, Jin B W, Xu S. Transpiration from three dominant shrub species in a desert - oasis ecotone of arid regions of Northwestern China. Hydrological Processes, 2016, 30(25): 4841-4854.
- [20] 包永志, 刘廷玺, 段利民, 王冠丽, 童新. 基于 Shuttleworth-Wallace 模型的科尔沁沙地流动半流动沙丘蒸散发模拟. 应用生态学报, 2019, 30(3): 867-876.
- [21] 王世雄, 郭华, 王孝安, 范玮熠. 扩散限制和环境筛选对子午岭森林群落构建的相对贡献. 中国农业科学, 2013, 46(22): 4733-4744.
- [22] Somers K M, Jackson D A. Putting the Mantel test back together again. Ecology, 2022, 103(10): e3780.
- [23] 刘麟菲, 谭冰冰, 殷旭旺, 张远, 孟伟. 在种与属两个级别评价太子河硅藻群落与环境因子的关系. 生态学报, 2014, 34(22): 6613-6621.
- [24] 黄雅茹, 辛智鸣, 李永华, 马迎宾, 董雪, 罗凤敏, 李新乐, 段瑞兵. 乌兰布和沙漠人工梭梭茎干液流季节变化及其与气象因子的关系. 南京林业大学学报: 自然科学版, 2020, 44(6): 131-139.
- [25] 唐信英, 宋云帆, 王鸽, 王明田. 1970—2020 年青藏高原近地面风速时空变化特征. 应用与环境生物学报, 2022, 28(4): 844-850.
- [26] 张宝珠, 王仰仁, 李金玉, 刘宏武, 武朝宝. 基于称重式蒸渗仪的春玉米蒸散量研究. 灌溉排水学报, 2021, 40(11): 17-25.
- [27] 刘峻杉, 高琼, 郭柯, 刘新平, 邵振艳, 张智才. 毛乌素裸沙丘斑块的蒸发量及其对降雨格局的响应. 植物生态学报, 2008, 32(1): 123-132.
- [28] 王韦娜, 张翔, 张立锋, 刘晓琴, 赵亮, 李奇, 古松. 蒸渗仪法和涡度相关法测定蒸散量的比较. 生态学杂志, 2019, 38(11): 3551-3559.
- [29] Huang L, Zhang Z S. Effect of rainfall pulses on plant growth and transpiration of two xerophytic shrubs in a revegetated desert area: Tengger Desert, China. CATENA, 2016, 137: 269-276.
- [30] 陈林, 杨新国, 宋乃平, 杨明秀, 肖绪培, 王兴. 干旱半干旱地区植物叶片水分吸收性状. 浙江大学学报: 农业与生命科学版, 2013, 39(5): 565-574.
- [31] 张泽, 孙贺阳, 李陶珂, 郑云暖, 王敏, 杨洁, 清华, 包铁军. 拆分典型草原群落蒸散组分方法研究. 中国草地学报, 2021, 43(4): 87-95.
- [32] Wang P, Li X Y, Huang Y M, Liu S M, Xu Z W, Wu X C, Ma Y J. Numerical modeling the isotopic composition of evapotranspiration in an arid artificial oasis cropland ecosystem with high-frequency water vapor isotope measurement. Agricultural and Forest Meteorology, 2016, 230/231: 79-88.
- [33] 李谦, 景元书, 马美娟, 王晗, 李根. 低丘红壤区稻田实际蒸散特征及其气象影响因素. 生态学杂志, 2018, 37(1): 219-226.
- [34] Ahmadi A, Daccache A, Snyder R L, Suvočarev K. Meteorological driving forces of reference evapotranspiration and their trends in California. Science of the Total Environment, 2022, 849: 157823.
- [35] He R Y, Jin Y F, Jiang J B, Xu M, Jia S. Sensitivity of METRIC-based tree crop evapotranspiration estimation to meteorology, land surface parameters and domain size. Agricultural Water Management, 2022, 271: 107789.
- [36] 荆思佳, 肖薇, 王晶苑, 郑有飞, 王伟, 刘强, 张圳, 胡诚. 1958—2017 年太湖蒸发量年际变化趋势及主控因子. 湖泊科学, 2022, 34(5): 1697-1711.
- [37] 左亚凡, 贺康宁, 柴世秀, 俞国峰, 李远航, 林莎, 陈琪, 王琼琳. 基于 Penman-Monteith 方程模拟青海云杉生长季日蒸腾过程. 生态学报, 2021, 41(9): 3656-3668.
- [38] 郭雯雯, 黄生志, 赵静, 李紫妍, 黄强, 邓铭江. 渭河流域潜在蒸散发时空演变与驱动力量化分析. 农业工程学报, 2021, 37(3): 81-89.
- [39] 王明田, 王翔, 黄晚华, 张玉芳, 马均. 基于相对湿度指数的西南地区季节性干旱时空分布特征. 农业工程学报, 2012, 28(19): 85-92, 295.
- [40] 刘国水, 刘钰, 蔡甲冰, 许迪. 农田不同尺度蒸散量的尺度效应与气象因子的关系. 水利学报, 2011, 42(3): 284-289.
- [41] Gentile P, Entekhabi D, Chehbouni A, Boulet G, Duchemin B. Analysis of evaporative fraction diurnal behaviour. Agricultural and Forest Meteorology, 2007, 143(1/2): 13-29.
- [42] Baldocchi D D, Wilson K B. Modeling CO₂ and water vapor exchange of a temperate broadleaved forest across hourly to decadal time scales. Ecological Modelling, 2001, 142(1/2): 155-184.
- [43] 孙树娇, 周秉荣, 周华坤, 王秀英, 权晨, 李甫, 陈奇. 青藏高原典型高寒荒漠生长季蒸散及水分消耗特征研究. 草地学报, 2021, 29(S1): 137-145.
- [44] 王军, 张瑞强, 李和平, 鹿海员, 曹雪松, 刘瑞春. 荒漠草原不同时间尺度下垫面水分消耗与气象植被因子的关系. 干旱地区农业研究, 2020, 38(4): 152-158, 167.
- [45] 周学雅, 王安志, 关德新, 袁凤辉. 科尔沁草地棵间土壤蒸发. 中国草地学报, 2014, 36(1): 90-97.
- [46] 艾鹏睿, 马英杰, 马亮. 干旱区滴灌枣棉间作模式下枣树棵间蒸发的变化规律. 生态学报, 2018, 38(13): 4761-4769.