

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2024.06.027.

党彩宇, 马岚, 崔永生, 等. 晋西黄土区刺槐林典型植物蒸腾特征及其环境响应[J]. 水土保持研究, 2024, 31(6): 243-251.

Dang Caiyu, Ma Lan, Cui Yongsheng, et al. Transpiration Characteristics and Environmental Response of Typical Plants in *Robinia pseudoacacia* Forest in Loess Area of Western Shanxi Province[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2024, 31(6): 243-251.

晋西黄土区刺槐林典型植物蒸腾特征及其环境响应

党彩宇¹, 马岚^{1,2}, 崔永生³, 邹春蕾¹

(1.北京林业大学 水土保持学院, 北京 100083; 2.北京林业大学

山西吉县森林生态系统国家野外科学观测研究站, 北京 100083; 3.北京师范大学 水科学研究院, 北京 100875)

摘要: [目的]揭示晋西黄土区刺槐林典型植物(乔木、灌木、草本)的蒸腾耗水规律,以期明确该区刺槐人工林蒸腾耗水的主导环境因子。[方法]利用 Li-6400XT 便携式光合仪对植物的蒸腾过程进行测定,并同步收集土壤水分及气象因子数据,分析了刺槐林典型植物蒸腾特征及其环境响应。[结果](1) 7 月,刺槐(乔木)和高羊茅(草本)的蒸腾速率日变化特征呈现双峰曲线规律,杠柳(灌木)蒸腾速率日变化特征为单峰曲线;9 月 3 种植物蒸腾速率的日变化特征均呈单峰曲线的趋势。(2) 研究期间 0—20 cm 土层的平均土壤体积含水率在 9.37%~18.09%,坡上的平均土壤含水量为 12.16%,坡下的平均土壤含水量为 15.41%。坡上刺槐和杠柳的蒸腾速率对土壤含水量的响应大于坡下,而高羊茅的蒸腾速率对土壤含水量的响应在坡上小于坡下。(3) 在坡上,光合有效辐射是驱动植物蒸腾的主导气象因子;在坡下,刺槐、杠柳和高羊茅蒸腾的主导气象因子分别为空气相对湿度、光合有效辐射和大气 CO₂ 浓度。(4) 在整个研究期间建立逐步回归拟合,刺槐和杠柳建立的方程可以更准确地模拟蒸腾速率,而高羊茅效果不理想。[结论]在晋西黄土区,不同植物蒸腾特征差异明显,且各植物影响蒸腾特征的环境因子因坡位而异,在植被建设过程中应综合考虑坡位以及环境因子的作用。

关键词: 刺槐林; 蒸腾; 土壤含水量; 气象因子; 晋西黄土区

中图分类号: Q948.1; S718.55

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2024)06-0243-09

Transpiration Characteristics and Environmental Response of Typical Plants in *Robinia pseudoacacia* Forest in Loess Area of Western Shanxi Province

Dang Caiyu¹, Ma Lan^{1,2}, Cui Yongsheng³, Zou Chunlei¹

(1.School of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China; 2.Jixian National Forest Ecosystem Observation and Research Station, National Ecosystem Research Network of China, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China; 3.College of Water Sciences, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

Abstract: [Objective] The aims of this study are to reveal the transpiration and water consumption pattern of typical plants (trees, shrubs, herbs) in *Robinia pseudoacacia* forests in the loess area of western Shanxi, and to clarify the dominant environmental factors of transpiration water consumption in *Robinia pseudoacacia* plantation forests in this area. [Methods] Li-6400XT portable photosynthesizer was used to measure the transpiration process of the plants, and the data of soil moisture and meteorological factors were synchronously collected to analyze the characteristics of the transpiration of typical plants in *Robinia pseudoacacia* forests and their environmental responses. [Results] (1) In July, the diurnal variation characteristics of transpiration rate of *Robinia pseudoacacia* and *Festuca elata* showed bimodal curves, and the diurnal variation characteristics of transpiration rate of *Periploca sepium* showed unimodal curves. The diurnal variation characteristics of transpiration rate of the three plants in September showed a unimodal

收稿日期: 2024-01-15

修回日期: 2024-01-25

资助项目: 国家自然科学基金“黄土区坡沟系统侵蚀形态演变及其动力学过程”(42077059)

第一作者: 党彩宇(1998—), 女, 山西临汾人, 硕士研究生, 研究方向为森林水文。E-mail: 936124538@qq.com

通信作者: 马岚(1981—), 女, 陕西宁强人, 博士, 教授, 主要从事山坡水文、森林水文研究。E-mail: mlpcz@sina.com

<http://stbcyj.paperonce.org>

curve, and there was an obvious change pattern. (2) The average soil volume water content of 0—20 cm soil layer during the study period was between 9.37% and 18.09%, and the average soil moisture contents were 12.16% on the upslope and 15.43% on the downslope. The response of the transpiration rate of *Robinia pseudoacacia* and *Periploca sepium* to soil water content on the upslope was greater than that on the downslope, while the transpiration rate of *Festuca elata* on the upslope was less responsive to soil water content than that on the downslope. (3) On the upslope, photosynthetically effective radiation was the dominant factor driving transpiration of forest stands. On the downslope, the dominant factor of each vegetation was different. The dominant factor of *Robinia pseudoacacia* was air relative humidity. The dominant factor of *Periploca sepium* was photosynthetically effective radiation. The dominant factor of *Festuca elata* was atmospheric CO₂ concentration. (4) During the entire research period, a stepwise regression fitting was established. The stepwise regression equations established for *Robinia pseudoacacia* and *Periploca sepium* could more accurately simulate transpiration rate, while the effect of *Festuca elata* was not ideal. [Conclusion] In the loess area of western Shanxi, the transpiration characteristics of different plants differ significantly, and the environmental factors affecting the transpiration characteristics of each plant vary according to the slope position, so the role of slope position as well as environmental factors should be considered comprehensively in the process of vegetation construction.

Keywords: *Robinia pseudoacacia* forest; transpiration; soil moisture content; meteorological factors; loess area of western Shanxi

黄土高原地区极易干旱缺水,且长期以来水土流失严重。为改善这种情况,该地区实施了“退耕还林(草)”工程,在黄土高原上大面积营造了刺槐(*Robinia pseudoacacia*)等人工树种。人工刺槐林在恢复生态环境的过程中,由于本身较高的耗水性造成土壤水分的过度消耗^[1],并且,刺槐林下物种多样性丰富,林下植被通过其一系列的生理生化活动调控着地上和地下的能量流动^[2],是构成森林生态系统的重要部分,对于维持人工林结构的稳定方面有着十分重要的作用。刺槐林地乔灌草植被共同制约着林地的水分生态环境,从而影响着人工植被的可持续恢复。植物蒸腾不仅仅是森林生态系统水文循环过程中的最重要的环节^[3],更是最主要的耗水方式,对森林生态系统的稳定性与水源涵养有着重要的影响^[4]。因此研究刺槐人工林林下植物蒸腾特征需重点从环境因子的影响入手。

近年来,我国不少学者围绕着植物蒸腾作用与环境因子的关系开展了详细的研究,在环境因子对蒸腾作用的响应等方面有了丰富的成果。研究主要发现不同树种蒸腾的变化特征及其对环境因子的响应关系存在着明显的差异,这种差异性与区域环境条件、植物对环境的响应息息相关^[5-6]。一般来讲,植物的蒸腾作用不仅受到自身生理生态特征的影响,同时也与太阳辐射等^[6]有关。目前已有更多关于林分蒸腾对环境因子响应的研究,但相关研究大都选取的是林

分中代表性的乔木来表示林分的蒸腾能力,忽略了林分的整体性,不能较好地反映林分整体的蒸腾特征,并且已有的研究^[7]表明林分蒸腾随坡位下降而升高,在坡脚处蒸腾又减少,也有研究结论相反^[8],针对蒸腾速率的坡位差异以及影响因子尚未有定论。

本文主要以晋西黄土区刺槐及林下典型灌木和草本为研究对象,对刺槐林的典型植物蒸腾速率与环境因子的关系进行相关分析,旨在揭示刺槐林地植被蒸腾的特征以及刺槐林地植被蒸腾的影响机制,以深入了解其蒸腾耗水的规律,从而为黄土区森林生态系统水文循环研究提供数据支撑,为该区域的人工林经营和植被建设提供科学指导。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于山西省吉县蔡家川小流域,所在地理坐标为 36°14'27"—36°18'23"N, 110°39'45"—110°47'45"E,属于典型的黄土残塬沟壑区,海拔 900~1 513 m,流域面积共计 40.10 km²,为暖温带大陆性季风气候,年平均降水量约 500 mm,降水年内分配不均,主要集中在 7 月、8 月、9 月份,约占全年降水量的 80.6%,潜在蒸发量 1 723.9 mm,年均气温为 10 ℃。土壤类型主要为褐土,黄土母质,土壤性质均匀,水土流失严重,人工造林乔木树种主要是刺槐(*Robinia pseudoacacia*)。研究区地理位置见图 1。

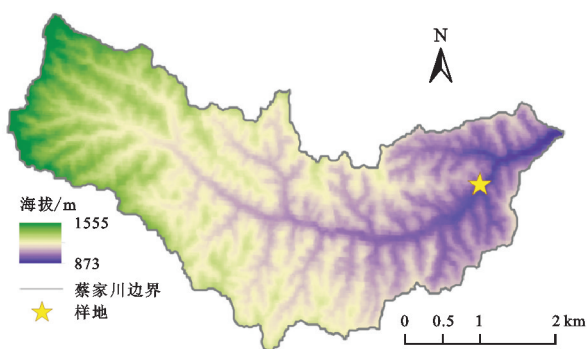


图1 研究区地理位置

Fig. 1 Geographical location of studied area

1.2 试验测定

1.2.1 样地设置 在蔡家川流域选取20年生,林分密度为1550株/hm²,平均树高为10.1 m,平均胸径为11.5 cm的人工刺槐纯林布设样地,林地灌木植物主要是杠柳(*Periploca sepium*);草本植物主要是高羊茅(*Festuca elata*)等,因此本研究选择的典型植物为刺槐、杠柳、高羊茅。

样地处于东南坡向、坡度为20°,样地中存在浅沟,浅沟两侧基本条件相似,故在对称两侧分别划分2个5 m×5 m样方,将样地分为坡上坡下分别进行观测。每个样方内设有土壤剖面水分探管(TRIME)进行土壤水分的监测,样方中分别选取3~4株树型相似的具有代表性的长势良好的刺槐标准木和具有代表性的高羊茅草本和杠柳灌木作为研究对象。

1.2.2 植物蒸腾速率测定 试验在2022年7—9月进行观测,利用便携式光合测定仪(Li-6400)^[9-10]对样地中的刺槐、灌木和草本分别测定蒸腾生理指标,刺槐选用高枝剪获取健壮枝条,摘取其中生长旺盛无病虫害叶片进行测定。每月选择1~2个连续典型无云晴朗天气,于8:00—16:00选择自然光源叶室,15 d左右测定一次(由于天气状况未能测定8月的日变化)。于每个样方中选取大小相近,长势均一的刺槐、杠柳和高羊茅各3株,每株选取待测植物中上部受光充足的3枚(簇)发育健全叶片,重复测定3次,每个叶片连续采取9个稳定数据,取平均值,间隔1.5 h测1次。同时每月选择3~4个连续典型无云晴朗天气在早上9:00—11:00测定单次变化,10 d左右测定一次,测定方法同日变化。

1.2.3 环境因子测定 本研究选择环境因子主要为土壤含水量和气象因子,其中,土壤含水量用土壤体积含水量表示,土壤体积含水量采用德国IMKO公司的TRIME型TDR土壤水分测定仪(IMKOTRIME-PICO-IPH)进行定期监测(时域反射仪法),将长度为2 m的TRIME管永久安装在样地中,测定深度为2 m,在0—100 cm中测定间隔10 cm,在100—

200 cm深度测定间隔20 cm。

利用全自动小型气象站(TRM-ZS3小气候观测站,锦州阳光气象科技有限公司)对气象因子进行长期的同步监测,其中设备型号为大气温度(PTS-3)、相对湿度(PTS-3)、光合有效辐射(TBQ-5)、大气CO₂浓度(ES-D),安装高度为2 m,测定大气CO₂浓度(Ca, μmol/mmol)、空气温度(T_{air} , °C)、空气相对湿度(RH, %)、光合有效辐射(PAR, μmol/(m²·s))等指标,设置的数据采集频率为每小时1次。

1.3 数据分析

本研究运用偏相关性分析法来完成蒸腾速率与影响因子之间的关系分析,通过构建回归方程和拟合曲线揭示环境因子与蒸腾速率之间的相关性,后续利用Microsoft Office Excel 2010对数据进行整理,Origin 2021软件进行相关绘图,通过SPSS 26.0软件对数据进行处理与相关性分析。

2 结果与分析

2.1 刺槐林典型植物蒸腾耗水变化特征

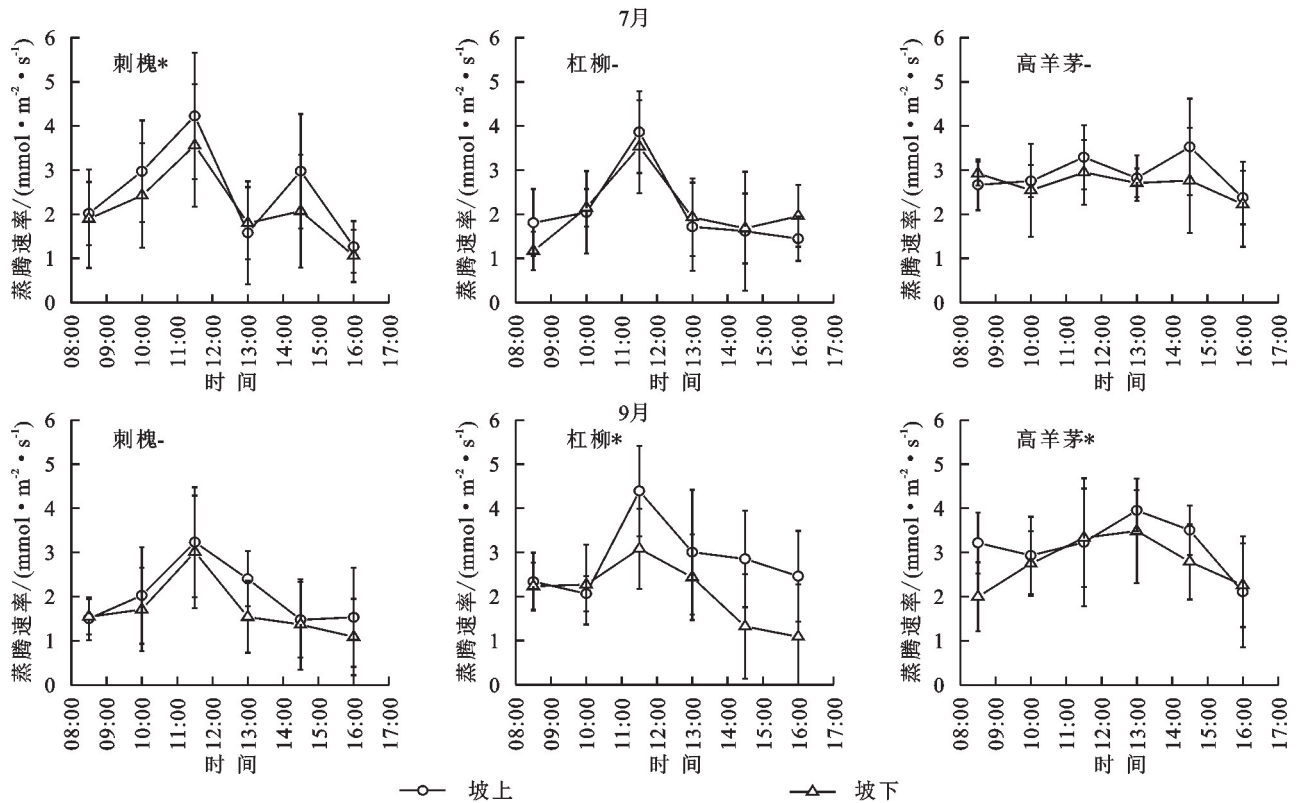
2.1.1 刺槐林典型植物日蒸腾变化特征 如图2蒸腾速率日变化曲线所示,3种植物的蒸腾速率日变化存在显著差异,同种植物的蒸腾速率日变化规律不受坡位的影响。7月,刺槐的蒸腾速率变化为双峰曲线,出现“午休”现象,在11:30,14:30左右出现最高值,在坡上蒸腾速率峰值为4.23,2.97 mmol/(m²·s),在坡下蒸腾速率峰值为2.55,2.07 mmol/(m²·s);高羊茅的蒸腾速率变化为双峰曲线,在11:30,14:30出现最高值,在坡上蒸腾速率峰值为3.29,3.52 mmol/(m²·s),在坡下蒸腾速率峰值为2.94,2.76 mmol/(m²·s)。而杠柳蒸腾速率变化为单峰曲线,在8:00—11:30间持续上升,在11:30达到最大值,分别为3.86 mmol/(m²·s)(坡上)和3.52 mmol/(m²·s)(坡下)之后蒸腾作用逐渐减弱。

9月,3种植物蒸腾速率日变化均为单峰曲线(图2)。刺槐的蒸腾速率11:30到达最大,坡上坡下的蒸腾速率峰值分别为3.23,3.01 mmol/(m²·s),随后开始下降;高羊茅蒸腾速率的峰值大致出现在13:00,坡上坡下的蒸腾速率峰值为3.95,3.48 mmol/(m²·s);杠柳的峰值出现在11:30,坡上坡下的蒸腾速率峰值分别为4.39,3.08 mmol/(m²·s)。同时,3种植物的蒸腾速率在坡上时峰值较大,坡下峰值较小,但经过差异性检验发现,不同坡位刺槐的蒸腾速率日变化在7月差异显著($p < 0.05$);在9月无显著差异;相反,杠柳与高羊茅在7月无显著差异,在9月差异显著($p < 0.05$)。

2.1.2 刺槐林典型植物月蒸腾变化特征 不同月份

刺槐及林下植物的蒸腾速率如图 3 所示,在坡上刺槐和高羊茅的蒸腾速率 7 月与 8 月、7 月与 9 月之间均存在显著差异($p<0.05$),8 月与 9 月不存在显著性差异,坡下时规律相同,可能是由于 7 月与 8 月以及 7 月与 9 月的土壤水分差异较为明显(图 4),刺槐对

于土壤水分的敏感性较高。在坡上时,杠柳的蒸腾速率 7 月与 9 月存在显著差异($p<0.05$),7 月与 8 月、8 月与 9 月之间无显著差异,坡下时,7 月与 8 月、7 月与 9 月之间存在显著差异($p<0.05$),8 月与 9 月不存在显著差异。



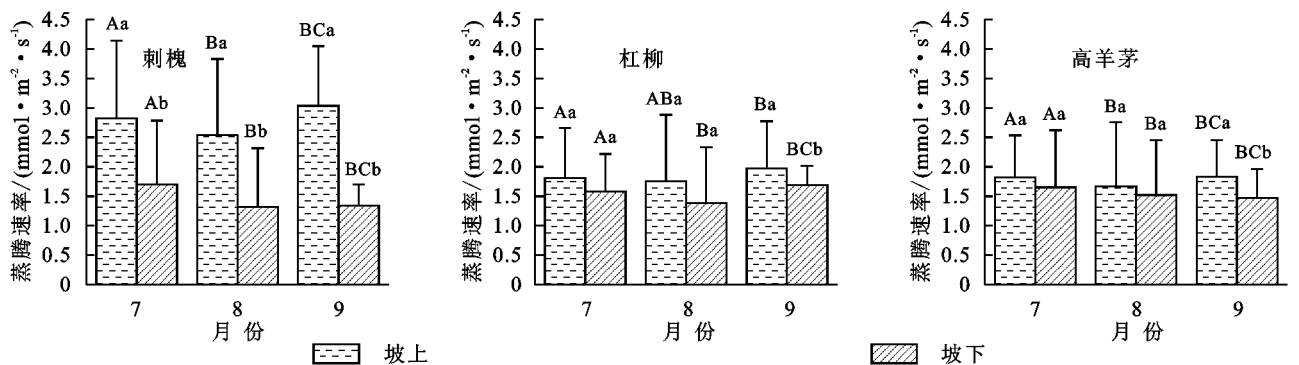
注:“*”表示不同坡位差异显著($p<0.05$);“-”表示不同坡位无显著性差异。

图 2 7 月、9 月刺槐林典型植物蒸腾速率日变化特征

Fig. 2 Diurnal variation of transpiration rate of *Robinia pseudoacacia* forest typical plants in July and September

3 种植物蒸腾速率在各月份均表现为坡上大于坡下,对不同坡位的植物蒸腾速率进行显著性差异分析发现,7 月、8 月、9 月的刺槐蒸腾速率坡上坡下差

异显著($p<0.05$);杠柳在 9 月的蒸腾速率坡上坡下差异显著($p<0.05$),7 月、8 月无显著性差异;高羊茅的规律与杠柳一致。



注:小写字母表示相同植物相同月份不同坡位的显著性差异($p<0.05$);大写字母表示相同植物相同月份不同月份的显著性差异($p<0.05$)。

图 3 不同月份刺槐林典型植物蒸腾速率对比

Fig. 3 Comparison of transpiration rates of *Robinia pseudoacacia* forest typical plants in different months

2.2 刺槐林典型植物蒸腾耗水与环境因子的相关性

2.2.1 环境因子动态变化特征 根据研究期间观测数据得知,太阳辐射整体呈下降趋势,日均 6.317 MJ/m^2 ,变化为 $0.276\sim 23.94 \text{ MJ/m}^2$;月平均气温为

20.17°C ,月最高气温出现在 8 月(22.98°C),最低气温出现在 6 月(16.77°C);日平均气温为 20.25°C ,最高气温为 36.6°C ,最低气温为 -0.4°C ,日均温最大值出现在 8 月(28.7°C),日均温最低温度出现在 5 月

(10.55℃)(图4);日均大气湿度为74%,变化范围在40.12%~99.80%,日最低大气湿度出现在5月(13.3%),最高大气湿度出现在8月(99.8%),月均大气湿度为74.07%,月均最低大气湿度出现在6月

(62.29%),最高大气湿度出现在8月(84.86%),0—20 cm土层的平均土壤体积含水率在9.37%~18.09%,坡上的平均土壤含水量为12.16%,坡下的平均土壤含水量为15.41%。

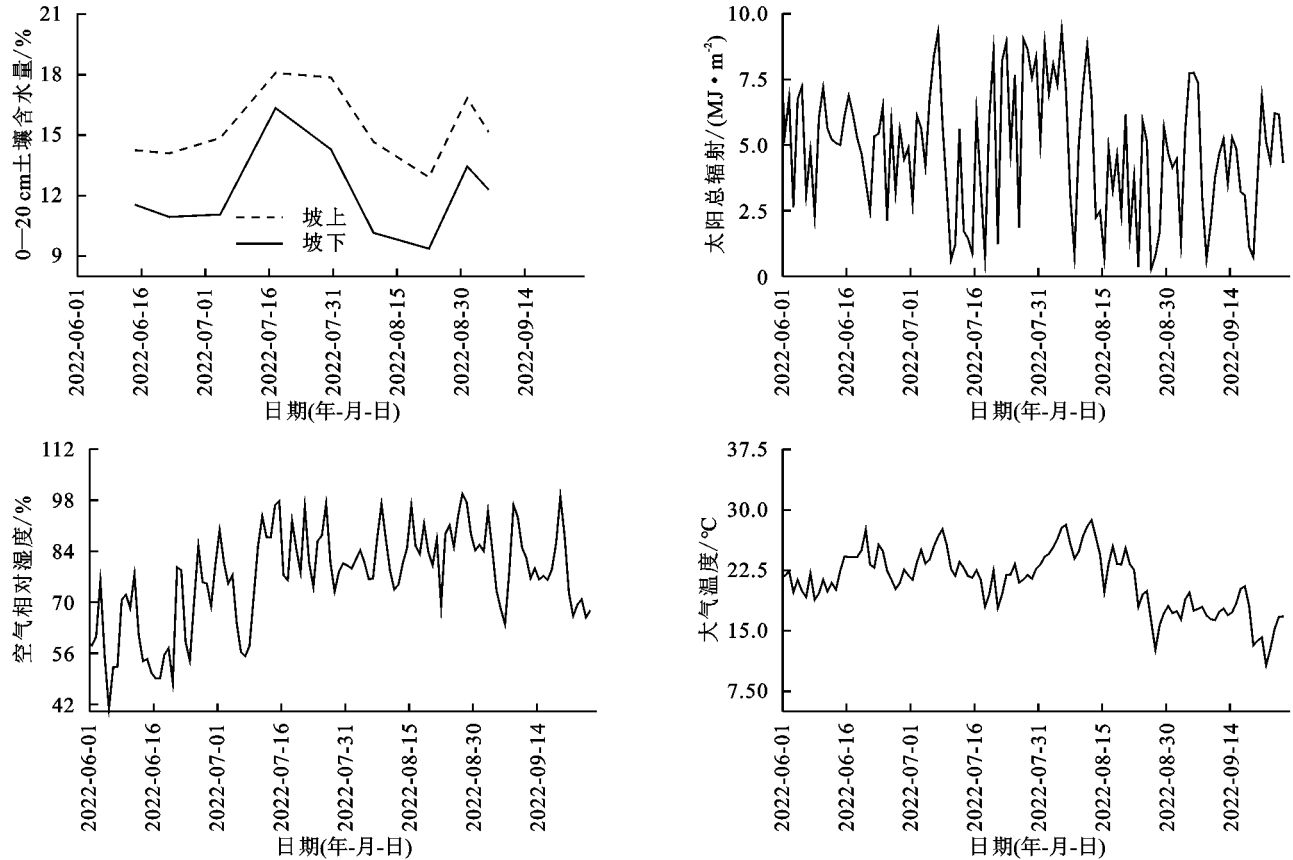


图4 研究期间气象因子的变化

Fig. 4 Changes in meteorological factors during the study period

2.2.2 蒸腾速率对土壤含水量的响应 经相关性分析,0—20 cm土层土壤含水量对林分蒸腾的影响较大($p < 0.01$),因此本文对刺槐及林下植物蒸腾速率与0—20 cm土壤含水量进行拟合回归分析如图5所示,土壤含水量对蒸腾速率变化解释程度均较大,且呈线性关系。刺槐和杠柳的蒸腾速率对土壤含水量的响应坡上

大于坡下,而高羊茅的蒸腾速率对土壤含水量的响应坡上小于坡下。在相同坡位时,针对不同植物对土壤含水量的响应表现为:在坡上,响应程度由大到小分别为刺槐、杠柳、高羊茅;在坡下,响应程度由大到小分别为高羊茅、刺槐、杠柳。结合图3可进一步得知刺槐的蒸腾速率差异性与土壤含水量的关系较为明显。

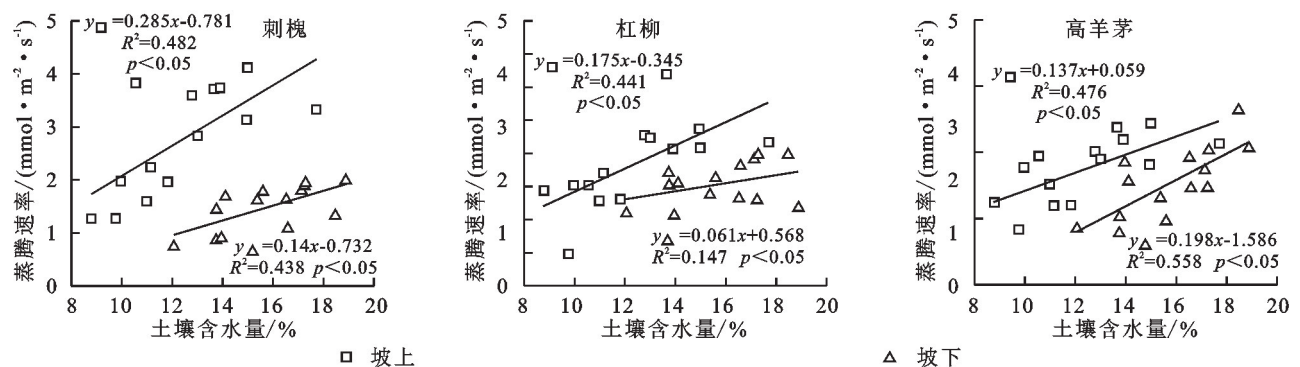


图5 刺槐林典型植物蒸腾速率与0—20 cm土壤含水量的拟合关系

Fig. 5 Fitting relationship between transpiration rate and soil water content of *Robinia pseudoacacia* forest typical plants

2.2.3 蒸腾速率对气象因子的响应 已有研究表明,林木蒸腾受多种因子影响,如空气温度、空气相对

湿度、太阳有效辐射等^[11],且现有的研究表明CO₂浓度会引起蒸腾速率的变化^[12],CO₂浓度对蒸腾速率

的影响各有不同。所以本研究选取气温(T_a)、空气相对湿度(RH)、大气 CO_2 浓度(Ca)和光合有效辐射(PAR)4 个环境因子。如图 6 所示,刺槐林不同坡位不同植物的蒸腾速率与大气温度、空气相对湿度、太阳辐射、大气 CO_2 浓度均有一定程度的极显著关系($p < 0.01$)。但在 7 月坡上刺槐蒸腾速率 Tr 与 Ca 无显

著相关,高羊茅蒸腾速率 Tr 与 Ca 相关性呈显著负相关($p < 0.05$);坡下高羊茅蒸腾速率 Tr 与 PAR 呈显著正相关($p < 0.05$)。在 9 月坡上刺槐蒸腾速率与 RH 呈显著负相关($p < 0.05$),高羊茅蒸腾速率 Tr 与 RH 无显著相关;坡下刺槐蒸腾速率 Tr 与 RH, T_a 无显著相关,与 Ca 呈显著负相关($p < 0.05$)。

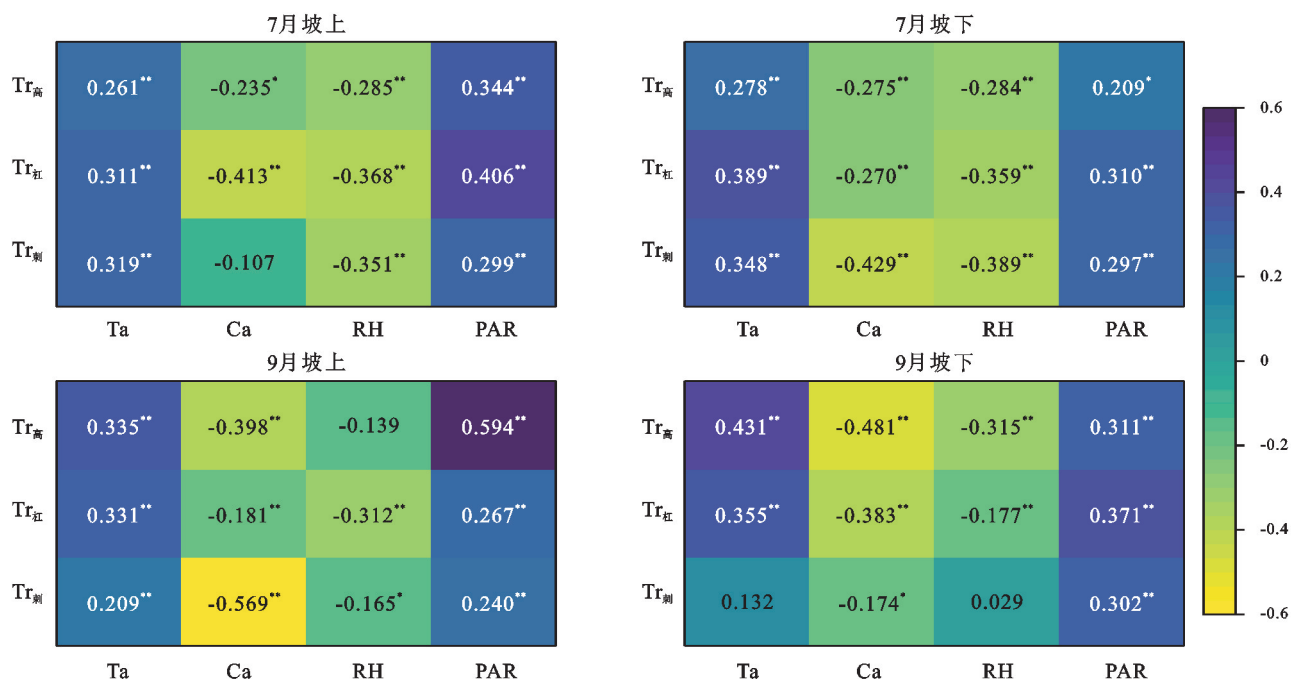


图 6 刺槐林典型植物蒸腾速率与环境因子的相关关系

Fig. 6 Correlation between transpiration rate and environmental factors of typical plants in *Robinia pseudoacacia* forest

为了准确地评价出刺槐及林下植物蒸腾速率 Tr 和各气象因子之间的相关程度,将其进行偏相关分析,从表 1 可知,7 月坡上:(1) 刺槐 Tr 与 RH , Ca 呈极显著偏相关,与 PAR 呈显著相关,与 T_a 不显著相关;(2) 杠柳 Tr 与 Ca , PAR 呈显著偏相关,与 T_a , RH 不显著相关;(3) 高羊茅 Tr 与 PAR 呈极显著偏相关,与其他环境因素不显著相关。坡下:(1) 刺槐 Tr 与 RH , Ca 呈极显著偏相关,与其他的环境因素不显著相关;(2) 杠柳 Tr 、高羊茅 Tr 与所选环境因素不显著相关。

9 月坡上:(1) 刺槐 Tr 与 T_a , Ca 呈极显著偏相关,与 PAR 呈显著相关,与其他环境因素的偏相关性不显著;(2) 杠柳 Tr 与环境因素的偏相关性都不显著;(3) 高羊茅 Tr 与 PAR , Ca 呈极显著偏相关,与 T_a 呈显著相关,与其他环境因素的偏相关性不显著。9 月坡下:(1) 刺槐 Tr 与 T_a , RH 呈极显著偏相关,与 Ca , PAR 的偏相关性不显著;(2) 杠柳 Tr 与 PAR 呈极显著偏相关,与其他的环境因素相关性不显著;(3) 高羊茅 Tr 与 Ca 呈极显著偏相关,与 PAR 呈显著偏相关,与 T_a , RH 的偏相关性不显著。

蒸腾速率 Tr 与环境因子进行回归分析见表 2,

以研究期为整体时间区间的逐步回归模型中,刺槐 Tr 的进入因子有 3 个,杠柳 Tr 的进入因子有 4 个,高羊茅的 Tr 的进入因子有 4 个;刺槐 Tr 可以被 T_a , RH 和 PAR 共同解释其变化量的 73%,杠柳 Tr 可以被 T_a , RH , PAR , Ca 共同解释其变化量的 64%,高羊茅 Tr 可以被 T_a , RH , PAR , Ca 共同解释其变化量的 25%。

3 讨论

3.1 刺槐林典型植物蒸腾耗水规律

本研究中 7 月刺槐和高羊茅的蒸腾速率日变化峰值出现在 11:30, 14:30, 是因为正午时分的温度最高,植物关闭气孔以减少蒸腾作用所失的水分,保持植物自身所需水分,在 14:30 后开始下降可能是因为植物在长时间的高温条件下水分大量流失,植物为保存原有状态只能关闭气孔以达到蒸腾速率下降的效果,这与周晓新等^[13]的研究规律相同。杠柳蒸腾速率日变化特征为单峰曲线。在 9 月,3 种植物的蒸腾速率日变化均表现为单峰曲线,未出现“午休”现象,可能是 9 月接近生长末季,太阳辐射相对减弱,植物不会因为高温造成水分流失。

表 1 刺槐林典型植物蒸腾速率和气象因子之间的偏相关系数

Table 1 Partial correlation coefficient between transpiration rate and meteorological factors of *Robinia pseudoacacia* forest typical plants

月份	树种	坡位	大气温度(Ta)	大气 CO ₂ 浓度(Ca)	空气相对湿度(RH)	光合有效辐射(PAR)
7 月	刺槐	坡上	0.005	0.187 * *	−0.188 * *	0.134 *
		坡下	0.003	−0.296 * *	−0.149 * *	0.008
	杠柳	坡上	0.029	−0.210 *	−0.015	0.194 *
		坡下	0.057	−0.047	−0.068	0.045
	高羊茅	坡上	0.001	−0.116	−0.025	0.208 * *
		坡下	0.038	−0.087	−0.036	0.041
9 月	刺槐	坡上	0.182 * *	−0.553 * *	−0.003	−0.139 *
		坡下	0.254 * *	−0.021	0.320 * *	0.101
	杠柳	坡上	0.148	−0.161	−0.092	0.082
		坡下	0.008	−0.038	−0.150	0.408 * *
	高羊茅	坡上	0.197 *	−0.317 * *	−0.055	0.569 * *
		坡下	0.160	−0.402 * *	0.112	−0.246 *

注:“* *”表示序列间极显著偏相关, $p<0.01$;“*”表示序列间显著偏相关, $p<0.05$ 。

表 2 研究期内 Tr 与各环境因子多元逐步线性回归模型

Table 2 Multiple stepwise linear regression model of Tr and each environmental factor during the study period

树种	因变量	进入因子	逐步回归方程	R^2
刺槐	Tr	Ta,RH,PAR	$Tr=57.98-1.055Ta-0.48RH-0.002PAR$	0.73
杠柳	Tr	Ta,RH,PAR,Ca	$Tr=42.6-0.714Ta-0.022Ca-0.32RH+0.004PAR$	0.64
高羊茅	Tr	Ta,RH,PAR,Ca	$Tr=37.79-0.89Ta-0.038Ca-0.559RH-0.001PAR$	0.25

注:Tr 为蒸腾速率。

已有研究^[7]证实蒸腾速率月变化特征呈现坡上大于坡下的趋势,可能是顺坡径流导致土壤含水量在坡面分配不均,使得林分蒸腾量随着坡位下降而升高,且在坡脚处林分蒸腾又显著降低^[14]。此外,坡下土壤含水量高于坡上,蒸腾速率却与之相反,可能是由于坡下的土壤水分含量高,但接受的太阳辐射和光照时间短,坡下环境光强温度低于坡上,导致坡下的植被蒸腾速率明显降低。对于刺槐来说,7 月、8 月、9 月的蒸腾速率坡上坡下差异显著($p<0.05$),杠柳和高羊茅在 7 月、8 月差异不显著,9 月蒸腾速率坡上坡下有着差异($p<0.05$)。一方面可能是刺槐为具有较高的耗水性的耐旱植物,生长过程中需要较多的水分供给^[15],而林地土壤水分充沛,已满足杠柳和高羊茅的正常生长,但低于刺槐的最佳需水量,另一方面,杠柳是耐旱性植物但适应性比刺槐强,因此水分出现差异时,刺槐的蒸腾速率表现为明显的差异性;此外根系的分布以及结构特点也影响着蒸腾速率对土壤水分条件响应的敏感性^[16],刺槐作为乔木树种,根系生物量、根长密度都较大,根系结构较为复杂,且由于晋西黄土区的地理环境使土壤浅层分布着较为丰富的养分,林木根系在较浅土壤中能获得充足的养分与水分,所以研究区刺槐根系分布较浅^[17],刺槐 0—10 cm 根系的集中分布模式反映了其对浅层土壤水的依赖

性很大^[18],对环境变化较为敏感。

3.2 刺槐林典型植物蒸腾耗水的环境因子响应

在本研究中土壤含水量表现为坡上<坡下,主要是由于坡上部风力较强,土壤蒸发强烈,造成了土壤水分的大量散失并且坡下更容易补给到地表径流以及地下水,使得坡下的土壤含水量高于坡上,这与前人^[19]的结论相似。此外,刺槐和杠柳的蒸腾速率对土壤含水量的响应在坡上时>坡下,考虑坡下为相对阴生环境,土壤含水量较多,空气相对湿度较大,导致蒸腾速率降低,而高羊茅蒸腾速率对土壤含水量的响应在坡上时<坡下,是由于高羊茅作为草本植物,具有更强的耐荫性^[20],在相对阴生环境中可以较好的生存。本研究还发现,0—20 cm 土壤含水量对刺槐及林下植物蒸腾速率均具有极显著影响($p<0.01$),贾国栋等^[5]研究却认为浅层土壤的水分不是影响植物蒸腾的重要因素。考虑可能是由于研究区的地理位置导致刺槐的水分利用来源存在一定差异,并且研究区的林分结构,时间尺度的差异对研究结果也会有一定的影响。因此关注林地的耗水特征不仅需要研究乔木,林下植物的耗水特征也很重要。

前人的研究表明,影响刺槐蒸腾速率的主导因子是大气温度 Ta^[21]或光合有效辐射 PAR^[22]。本研究从林地的乔灌草 3 种植物出发,得出在坡上时光合有

效辐射 PAR 是影响乔木、灌木、草本蒸腾速率的主导环境因子,在坡下时,空气相对湿度 RH 是刺槐蒸腾速率的主要影响因素,可能是树种对不同地域的环境因子响应不同。且已有的研究将乔木的蒸腾特征影响因素代表林地的蒸腾特征响应机制,但本研究得出林下植物蒸腾的主导因素各不相同。影响杠柳蒸腾速率的主导因子为 PAR,而有研究^[23]认为影响杠柳蒸腾速率日变化的主要因素是气温。与本研究的结果不同,可能是因为杠柳生存的林分结构,小气候环境不同。同时有学者^[24]提出大气 CO₂ 浓度升高可以影响高羊茅的蒸腾速率,与本研究结果相似,可能是研究区年均气温大于 10℃ 时,植物蒸腾变化对 CO₂ 浓度的响应敏感性最高^[25]。本研究仅着重分析了生长季内刺槐林地有代表性的乔木、灌木、草本蒸腾特征及其影响因素,而后续的分析还需基于更多植物类型的观测,才能深入完整地揭示刺槐林地的蒸腾特征及其对环境的响应规律。

4 结 论

(1) 7 月刺槐和高羊茅的蒸腾速率的日变化呈双峰曲线,杠柳蒸腾速率呈单峰型日变化;在 9 月 3 种植被蒸腾速率的日变化均呈单峰曲线。

(2) 研究期间 0—20 cm 土层的平均土壤体积含水率在 9.37%~18.09%,坡上的平均土壤含水量为 12.16%,坡下的平均土壤含水量为 15.41%。坡上刺槐蒸腾速率对土壤含水量的响应大于坡下,坡上杠柳的蒸腾速率对土壤含水量的响应大于坡下,而坡上高羊茅的蒸腾速率对土壤含水量的响应小于坡下。

(3) 不同坡位,林分蒸腾对气象因子的响应存在差异。在坡上,PAR 为驱动林分蒸腾的主导因子;在坡下,各植被主导因子不同,刺槐的主导因子为空气相对湿度 RH,杠柳的主导因子为 PAR,高羊茅的主导因子为大气 CO₂ 浓度 Ca。

(4) 在整个研究期间建立逐步回归拟合,刺槐和杠柳建立的逐步回归方程可以更准确地模拟蒸腾速率,而高羊茅效果不理想,在自然条件下,逐步回归模型拟合在一定程度上是可以对人工乔木和灌木的蒸腾速率进行解释的。

参考文献(References):

- [1] Mei X M, Zhu Q K, Ma L, et al. Effect of stand origin and slope position on infiltration pattern and preferential flow on a Loess hillslope[J]. Land Degradation & Development, 2018,29(5):1353-1365.
- [2] 毛亦杨,陈富强,郭勇,等.不同林龄红锥人工林林下植被物种多样性恢复动态[J].应用与环境生物学报,2021,27(4):930-937.
- [3] Mao Y Y, Chen F Q, Guo Y, et al. Restoration dynamics of understory species diversity in *Castanopsis hystrix* plantations at different ages[J]. Chin J Appl Environ Biol, 2021,27(4):930-937.
- [4] 尚友贤,满秀玲,徐志鹏.多年冻土区白桦次生林蒸腾特征及其对影响因子的响应[J].水土保持学报,2023,37(2):310-319.
- [5] Shang Y X, Man X L, Xu Z P. Transpiration characteristics and its response to influence factors of *Betula platyphylla* secondary forest in permafrost area[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2023,37(2):310-319.
- [6] Bosch D D, Marshall L K, Teskey R. Forest transpiration from sap flux density measurements in a Southeastern Coastal Plain riparian buffer system[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2014,187:72-82.
- [7] 贾国栋,陈立欣,李瀚之,等.北方土石山区典型树种耗水特征及环境影响因子[J].生态学报,2018,38(10):3441-3452.
- [8] Jia G D, Chen L X, Li H Z, et al. The effect of environmental factors on plant water consumption characteristics in a northern rocky mountainous area[J]. Acta Ecologica Sinica, 2018,38(10):3441-3452.
- [9] Liu F Y, You Q G, Xue X, et al. The stem sap flow and water sources for *Tamarix ramosissima* in an artificial shelterbelt with a deep groundwater table in Northwest China[J]. Frontiers in Plant Science, 2022,13:794084.
- [10] 王云霓,曹恭祥,王彦辉,等.六盘山南侧华北落叶松人工林冠层蒸腾及其影响因子的坡位差异[J].应用生态学报,2018,29(5):1503-1514.
- [11] Wang Y N, Cao G X, Wang Y H, et al. Canopy transpiration of *Larix principis-rupprechtii* plantation and its impact factors in different slope locations at the south side of Liupan Mountains, China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2018,29(5):1503-1514.
- [12] 王艳兵,王彦辉,熊伟,等.六盘山半干旱区华北落叶松树干液流速率及主要影响因子的坡位差异[J].林业科学,2017,53(6):10-20.
- [13] Wang Y B, Wang Y H, Xiong W, et al. Variation in the sap flow velocity of *Larix principis-rupprechtii* and its impact factors in different slope positions in a semi-arid region of Liupan mountains[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2017,53(6):10-20.
- [14] 曹奇光,张学培,牛丽丽,等.晋西黄土区人工刺槐林生理生态特点分析与研究[J].水土保持研究,2007,14(3):330-332,335.
- [15] Cao Q G, Zhang X P, Niu L L, et al. Analyze and study on characteristics of artificial *robinia pseudacacia*

- plantation physiological ecology in loess areas in West Shanxi[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2007, 14(3): 330-332, 335.
- [11] 乔雨宁,任婧宇,韦思瀚,等.黄土丘陵区5种主要乔灌木树种光合生理生态特征[J].水土保持研究, 2021, 28(6): 397-406.
- Qiao Y N, Ren J Y, Wei S H, et al. Photosynthetic physiological and ecological characteristics of 5 main forest & shrub stands in Loess Hilly Region[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2021, 28(6): 397-406.
- [12] Ainsworth E A, Long S P. What have we learned from 15 years of free-air CO₂ enrichment (FACE): A meta-analytic review of the responses of photosynthesis, canopy properties and plant production to rising CO₂ [J]. New Phytologist, 2004, 165(2): 351-372.
- [13] 周晓新,张建军,李铁涛.黄土高原主要水土保持树种的蒸腾特性[J].中国水土保持科学, 2009, 7(4): 44-48, 54.
- Zhou X X, Zhang J J, Li Y T. Transpiration characteristics of major tree species for soil and water conservation in Loess Plateau[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2009, 7(4): 44-48, 54.
- [14] 刘建立,王彦辉,于澎涛,等.六盘山叠叠沟小流域典型坡面土壤水分的植被承载力[J].植物生态学报, 2009, 33(6): 1101-1111.
- Liu J L, Wang Y H, Yu P T, et al. Vegetation carrying capacity based on soil water on typical slopes in the Diediegou small watershed of Liupan mountains, north-western China[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2009, 33(6): 1101-1111.
- [15] 郭宝妮,张建军,王震,等.晋西黄土区刺槐林耗水特征[J].生态学报, 2012, 31(11): 2736-2741.
- Guo B N, Zhang J J, Wang Z, et al. Characteristics of water consumption by *Robinia pseudoacacia* forest on Loess Plateau of western Shanxi Province, China[J]. Chinese Journal of Ecology, 2012, 31(11): 2736-2741.
- [16] 赵平,饶兴权,马玲,等.基于树干液流测定值进行尺度扩展的马占相思林段蒸腾和冠层气孔导度[J].植物生态学报, 2006, 30(4): 655-665.
- Zhao P, Rao X Q, Ma L, et al. Sap flow-scaled stand transpiration and canopy stomatal conductance in an *Acacia mangium* forest[J]. Journal of Plant Ecology, 2006, 30(4): 655-665.
- [17] 郭钰,姚佳峰,董媛,等.油松和刺槐纯林及混交林根系分布特征[J].应用生态学报, 2023, 34(11): 2881-2888.
- Guo Y, Yao J F, Dong Y, et al. Root distribution characteristics of monoculture and mixture of *Pinus tabulaeformis* and *Robinia pseudoacacia* plantation[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2023, 34(11): 2881-2888.
- [18] 吴应明,韩璐,刘柯言,等.晋西黄土区不同土壤水分条件下刺槐和侧柏人工林的水分利用来源[J].应用生态学报, 2023, 34(3): 588-596.
- Wu Y M, Han L, Liu K Y, et al. Water source of *Robinia pseudoacacia* and *Platycladus orientalis* plantations under different soil moisture conditions in the Loess Plateau of Western Shanxi, China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2023, 34(3): 588-596.
- [19] Fu B J, Wang J, Chen L D, et al. The effects of land use on soil moisture variation in the Danangou Catchment of the Loess Plateau, China[J]. Catena, 2003, 54(1/2): 197-213.
- [20] 陈高路,庞丹波,马进鹏,等.贺兰山10种典型植物光合及水分利用效率特征研究[J].西北植物学报, 2021, 41(2): 290-299.
- Chen G L, Pang D B, Ma J P, et al. Study on photosynthesis and water use efficiency of ten typical plants in Helan Mountain[J]. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica, 2021, 41(2): 290-299.
- [21] 费俊娥,焦陇慧,吴贤忠,等.陇东黄土高原区人工刺槐树干液流特征[J].甘肃农业大学学报, 2020, 55(6): 131-139.
- Fei J E, Jiao L H, Wu X Z, et al. Study on sap flow characteristics of *Robinia pseudoacacia* artificially grown in hilly and Gully Region of Loess Plateau in eastern Gansu [J]. Journal of Gansu Agricultural University, 2020, 55(6): 131-139.
- [22] 吴芳,陈云明,于占辉.黄土高原半干旱区刺槐生长盛期树干液流动态[J].植物生态学报, 2010, 34(4): 469-476.
- Wu F, Chen Y M, Yu Z H. Growing season sap-flow dynamics of *Robinia pseudoacacia* plantation in the semi-arid region of Loess Plateau, China[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2010, 34(4): 469-476.
- [23] 步秀芹.黄土丘陵区主要灌草种蒸腾耗水特性研究[D].陕西杨凌:西北农林科技大学, 2007.
- Bu X Q. Transpiration and Water Consumption Characteristics of Major Plant Species of Shrub and Grass Communities in the Loess Hilly Region[D]. Yangling, Shaanxi: Northwest A&F University, 2007.
- [24] 张学霞,杨璐璐,华开.CO₂浓度对高羊茅抗旱性及水分利用效率的影响分析[J].草地学报, 2015, 23(3): 502-509.
- Zhang X X, Yang L L, Hua K. Effects of CO₂ concentration on tall fescue drought resistance and water use efficiency[J]. Acta Agrestia Sinica, 2015, 23(3): 502-509.
- [25] 田静.大气CO₂浓度增加对中国区域植被蒸腾的影响[J].地球科学进展, 2021, 36(8): 826-835.
- Tian J. Effects of atmospheric CO₂ concentration on vegetation transpiration over China [J]. Advances in Earth Science, 2021, 36(8): 826-835.