

DOI: 10.13324/j.cnki.jfcf.202505001

环境要素对樟子松人工林蒸散的影响

高翔^{1,2}, 蔡金峰², 裴松义³, 黄辉^{1,4}, 张劲松^{1,2}

(1. 中国林业科学研究院林业研究所国家林草局林木培育重点实验室, 北京 100091;

2. 南京林业大学南方现代林业协同创新中心, 江苏 南京 210037;

3. 国有建平黑水机械化林场, 辽宁 朝阳 122000;

4. 河南小浪底森林生态系统国家野外科学观测研究站, 河南 济源 454650)

摘要: 为探明樟子松人工林蒸散动态变化规律及其对环境要素的响应, 于 2021、2022 年对辽宁西部樟子松人工林蒸散和环境要素进行连续观测。结果表明: 2021、2022 年樟子松人工林蒸散分别为 394.93、455.99 mm, 降水减蒸散剩余量分别为 237.87、119.11 mm。2 a 生长季内樟子松人工林蒸散的主要控制因素均为净辐射、空气温度、空气相对湿度、表层土壤含水量和归一化植被指数, 且归一化植被指数的相关系数均为最大。冠层导度与作物系数、Priestley-Taylor 系数、耦合系数均呈现指数关系, 且冠层导度阈值为 $10 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ 。当归一化植被指数大于 0.55 时, 冠层导度、作物系数、Priestley-Taylor 系数、耦合系数均随归一化植被指数增大而快速增大; 饱和水汽压差对 4 种表面参数均有明显的抑制作用; 表层土壤含水量则对 4 种表面参数均具有明显的线性促进作用。辽宁西部樟子松人工林可储蓄部分降水, 冠层发展是控制蒸散季节动态的最重要环境要素, 表面参数受植被绿度、土壤和大气水分状态的强烈影响。

关键词: 涡度相关; 樟子松人工林; 蒸散; 表面参数; 辽宁西部

中图分类号: S715.4

文献标志码: A

文章编号: 2096-0018(2025)06-0607-11



开放科学标识码
(OSID 码)

Effects of environmental factors on evapotranspiration in a *Pinus sylvestris* var. *mongolica* plantation

GAO Xiang^{1,2}, CAI Jinfeng², PEI Songyi³, HUANG Hui^{1,4}, ZHANG Jinsong^{1,2}

(1. Key Laboratory of Tree Breeding and Cultivation, National Forestry and Grassland Administration, Research Institute of Forestry, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China; 2. Co-Innovation Center for Sustainable

Forestry in Southern China, Nanjing Forestry University, Nanjing, Jiangsu 210037, China;

3. State-owned Jianping County Heishui Mechanized Forest Farm, Chaoyang, Liaoning 122000, China;

4. Henan Xiaolangdi Forest Ecosystem National Observation and Research Station, Jiyuan, Henan 454650, China)

Abstract: This study aims to investigate evapotranspiration and its response to environmental factors and ascertain the land-atmosphere interactions in *Pinus sylvestris* var. *mongolica* plantations of China. The eddy-covariance technique and corresponding environmental sensors were used to continuously measure evapotranspiration and environmental factors in a *P. sylvestris* var. *mongolica* plantation in the western Liaoning Province in 2021 and 2022. The results showed that the plantation had the annual evapotranspiration of 394.93 mm and 455.99 mm, the precipitation minus evapotranspiration of 237.87 mm and 119.11 mm in 2021 and 2022, respectively. Net radiation, air temperature, air relative humidity, top soil water content, and normalized difference vegetation index were the key controlling factors of evapotranspiration, and the correlation coefficient with normalized difference vegetation index was highest during the growing seasons in the two years. Canopy conductance had exponential relationships with crop coefficient, Priestley-Taylor coefficient, and decoupling coefficient, and the threshold value of canopy conductance was $10 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$. When normalized difference vegetation index was greater than 0.55, canopy conductance, crop coefficient, Priestley-Taylor coefficient, and decoupling coefficient increased rapidly with the increase in normalized difference vegetation index. The vapor pressure deficit had significantly negative effects on those surface parameters. And those surface parameters were promoted linearly by top soil water content in this plantation. The *P. sylvestris* var. *mongolica* plantation in the western Liaoning Province stored a part of precipitation. Canopy development dominated the seasonal variations of evapotranspiration, and four surface parameters were significantly influenced by vegetation greenness and soil and atmospheric water status.

Key words: eddy covariance; *Pinus sylvestris* var. *mongolica* plantation; evapotranspiration; surface parameters; western Liaoning Province

收稿日期: 2025-05-06 修回日期: 2025-07-11

基金项目: 国家自然科学基金项目“干旱事件对辽西樟子松人工林碳收支过程的影响及其机制”(32301662)。

第一作者简介: 高翔(1989-), 男, 助理研究员, 从事人工林水碳循环方面研究。Email: gaoliang@caf.ac.cn。

通信作者: 张劲松(1968-), 男, 研究员, 从事林业气象学研究。Email: zhangjs@caf.ac.cn。

地表与大气间的水汽交换是生态学领域关注的主要问题之一^[1-3]。在陆地生态系统中,蒸散(evapotranspiration, ET 或 E)与植被生产力相互耦合^[4],同时蒸散作为水循环的重要组成部分驱动生物地化循环^[5],另外,蒸散还对应下垫面能量交换中的潜热通量,进而成为土地覆盖和气候变化相互作用的重要媒介^[6]。在气交换研究中,表面参数是用来表征交换强度的多个指标,可指示植被生理状态,并在蒸散模拟中起到重要作用,明确表面参数动态变化及其关键控制因子,已成为多角度研究下垫面水分耗散不可或缺的部分,故而近年来表面参数也越来越受到生态学者的关注^[6-7]。探索蒸散和表面参数在土地覆盖与气候变化之间复杂反馈中扮演的角色,对预测陆地生态系统在未来生物或物理干扰下可能产生的变化至关重要^[8-9]。因此,有必要研究不同生态系统的蒸散和表面参数,以揭示陆地水碳循环和其他生态系统过程的控制机制。

近 20 a, 涡度相关技术因其对下垫面破坏小、可长期观测、数据连续性强等优点,已成为观测地气交换的标准方法^[10]。森林生态系统的蒸散已采用此方法进行了一定程度的研究^[6-8],森林蒸散的季节变化主要受植被特征、能量供给、土壤和大气水分状态控制,但不同森林生态系统蒸散的关键控制要素并不相同^[11-12]。冠层导度(canopy conductance, G_c)、作物系数(crop coefficient, K_c)、Priestley-Taylor 系数(Priestley-Taylor coefficient, α)和耦合系数(decoupling coefficient, Ω)4种表面参数与蒸散具有相似的季节动态,但对环境要素的响应并不完全一致^[1,7,13],且不同森林生态系统中表面参数对相同环境要素的响应也不同^[6,9]。但总体来说,关于干旱半干旱地区人工林蒸散和表面参数的研究至今还比较缺乏。干旱半干旱地区的生态系统,超过 90%的降水以蒸散的形式散失,植被生理活性经常受到水分胁迫威胁^[1,6,12]。由于生态修复工程的实施,不同树种的人工林广泛种植于我国东北半干旱区^[14],但该地区气候干暖化趋势明显,导致水树矛盾不断加剧,已严重威胁当地人工林健康和经营^[6]。在气候变化背景下,研究我国东北半干旱区重要树种的人工林蒸散和表面参数变化规律及其对环境要素的响应,可促进该地区人工林可持续经营。

樟子松(*Pinus sylvestris* var. *mongolica*)因其具有耐寒耐旱、防风固沙、材质优良等特点,被选为营建三北防护林工程的重要树种之一,在我国东北半干旱区大量种植^[15]。目前关于樟子松人工林地气交换的相关研究依然缺乏报道。本研究选择辽宁省西部半干旱区樟子松人工林为研究对象,采用涡度相关技术观测了 2021、2022 年蒸散,并结合植被绿度、空气温湿度、净辐射、土壤水分和风速监测数据,探明樟子松人工林蒸散动态与环境要素之间的关系和水量平衡现状,解析樟子松人工林表面参数动态及其对植被绿度、大气和土壤水分状态的响应规律。本研究旨在解析辽宁西部樟子松人工林水分耗散特征及其对环境要素的响应,以期为准评估当地植被恢复过程中的水分利用情况提供参考。

1 研究区概况与研究方法

1.1 研究区概况

试验地位于辽宁省朝阳市国有建平县黑水机械化林场樟子松人工林内,地理位置为北纬 41°58'33",东经 119°25'32",海拔 550 m,属半干旱区,气候为大陆性季风气候,年平均气温 5.76 °C,年平均降水量 440 mm。樟子松人工林林龄为 35 a,现存密度为 1 044 株·hm⁻²,平均胸径为 14.26 cm,平均树高为 10.00 m。试验地下垫面连续均一旦地形平整,土壤类型为褐土,林下植被主要为糙隐子草(*Cleistogenes squarrosa*),覆盖度随土壤水分状况波动较大,在 10%~70%之间^[15]。

1.2 试验观测与通量数据处理

涡度相关系统由三维超声风速仪(CSAT3B, Li-COR Inc., 美国)和 H₂O/CO₂ 红外气体分析仪(LI-7500, Campbell Scientific Inc., 美国)组成。观测指标包括潜热通量(latent heat flux, F_{lh})、风速(wind speed, S_w)、空气密度(air density, ρ_a)和干空气比热(the specific heat of the dry air, C_p)。本研究中空气温度(air temperature, t_a)和空气相对湿度(air relative humidity, H_a)采用空气温/湿度探头(HMP45C, Vaisala Ltd., 芬兰)观测;净辐射(net radiation, R_n)采用净辐射探头(CNR4, Kipp&Zonen B.V., 荷兰)获得;表层土壤含水量(top soil water content, SWC 或 C_{sw})由土壤水分探头(CS650, Campbell Scientific Inc., 美国)测量;土壤热通量(soil heat flux, F_{sh})和降水量分别由土壤热通量板(HFP01SC,

Hukseflux B.V., 荷兰)和雨量筒(TE525, Texas Electronics Inc., 美国)观测。涡度相关系统和环境要素探头均依托 18 m 高的观测塔安装。采用 CR1000X 数据采集器(Campbell Scientific Inc., 美国)收集所有来自观测塔的数据。涡度相关系统距地面 15 m 安装, 观测塔距离最近的樟子松林缘为 300 m, 依据通量足迹分析可确保测量信息源自目标对象^[16]。归一化植被指数(normalized difference vegetation index, NDVI或 I_{ndv})采用下垫面入射和反射光谱信息获得^[4]。

使用 Eddypro 7.0.7 软件(Li-COR Inc., 美国)对 10 Hz 原始数据进行校准和质量控制, 并产生 30 min 平均数据。数据校准包括二次坐标旋转校准、超声虚温校准、空气密度效应校准、除趋势校准、迎角校准及高通与低通滤波校准。通过剔除主要因降水或水汽凝结而导致数据质量标记为“2”的数据进行数据质量控制。因数据质量控制和断电等因素造成了约 17% 的潜热通量数据缺失。采用波纹比强制闭合法对可用能量组分进行强制闭合校准^[17]。对短期(≤ 2 h)和长期(> 2 h)缺失的潜热通量数据分别采用线性方程法和平均日变化法进行插补。

1.3 参数计算

本研究中, 蒸散(E , $\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$)计算公式如下^[18]:

$$E = \frac{F_{lh}}{\lambda} \quad (1)$$

式中: F_{lh} 为潜热通量($\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$); λ 为水气化潜热($2.45 \text{ MJ}\cdot\text{kg}^{-1}$)。

作物系数(K_c)计算公式如下^[6]:

$$K_c = \frac{E}{E_0} \quad (2)$$

$$E_0 = \frac{0.408\Delta(R_n - F_{sh}) + 900S_w\gamma D_{vp}/(t_a + 273.3)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34S_w)} \quad (3)$$

式中: E_0 为参考蒸散($\text{mm}\cdot\text{d}^{-1}$); R_n 为净辐射($\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$); F_{sh} 为土壤热通量($\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$); S_w 为风速($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$); D_{vp} 为饱和水汽压差(kPa); t_a 为空气温度($^{\circ}\text{C}$); Δ 为水汽压曲线斜率($\text{kPa}\cdot^{\circ}\text{C}^{-1}$); γ 为干湿表常数($\text{kPa}\cdot^{\circ}\text{C}^{-1}$)。

冠层导度(G_c , $\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$)计算公式如下^[9]:

$$G_c = \frac{\gamma F_{lh} G_a}{\Delta(R_n - F_{sh}) + \rho_a C_p D_{vp} G_a - F_{lh}(\Delta + \gamma)} \times 1000 \quad (4)$$

式中: G_a 为空气动力学导度($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$); ρ_a 为空气密度($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$); C_p 为干空气比热($\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot^{\circ}\text{C}^{-1}$)。

耦合系数(Ω)计算公式如下^[9]:

$$\Omega = \frac{\Delta + \gamma}{\Delta + \gamma(1 + G_a/G_c)} \quad (5)$$

Priestley-Taylor 系数(α)计算公式如下^[19]:

$$\alpha = \frac{E}{E_e} \quad (6)$$

$$E_e = \frac{\Delta(R_n - F_{sh})}{(\Delta + \gamma)\lambda} \quad (7)$$

式中: E_e 为平衡蒸散($\text{mm}\cdot\text{d}^{-1}$)。

1.4 数据处理

使用 R 软件“lavaan”包对蒸散与环境要素进行通径分析; 冠层导度与作物系数、Priestley-Taylor 系数和耦合系数之间的指数曲线关系, 归一化植被指数、饱和水汽压差和表层土壤含水量与冠层导度、作物系数、Priestley-Taylor 系数和耦合系数间的二次曲线、对数曲线或直线关系均使用 SPSS 软件拟合; 采用 Origin 2017 软件作图。

2 结果与分析

2.1 环境要素季节变化

2021、2022 年樟子松人工林环境要素日平均值或日总量季节变化见图 1。净辐射在年内总体呈先升后降的变化趋势，受天气状况影响而波动剧烈，变化范围为 $-2.42 \sim 21.00 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ 。空气温度总体季节变化与净辐射相似，但逐日波动远小于净辐射，最大值和最小值分别为 $28.59 \text{ }^\circ\text{C}$ 和 $-23.08 \text{ }^\circ\text{C}$ 。空气相对湿度随天气情况而剧烈波动，2021、2022 年平均值分别为 60.86%、56.78%。饱和水汽压差 (vapor pressure deficit, VPD 或 D_{vp}) 在雨季来临前达到全年最大值，雨季来临后迅速减小，2021、2022 年峰值分别为 3.26、2.69 kPa。风速总体上在 $1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 水平以上波动，2021、2022 年平均值分别为 1.70、 $1.90 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。归一化植被指数在每年的 4 月初开始缓慢增大，10 月末回落至冬季较小数值，因此，将 4—10 月定义为樟子松生长季，年内其他月份为非生长季，2021、2022 年归一化植被指数峰值分别为 0.66、0.79。2021、2022 年总降水量分别为 632.80、576.10 mm，但 2021 年降水集中于 7—9 月，而 2022 年为 6—7 月，表层土壤含水量随降水事件的发生而波动。

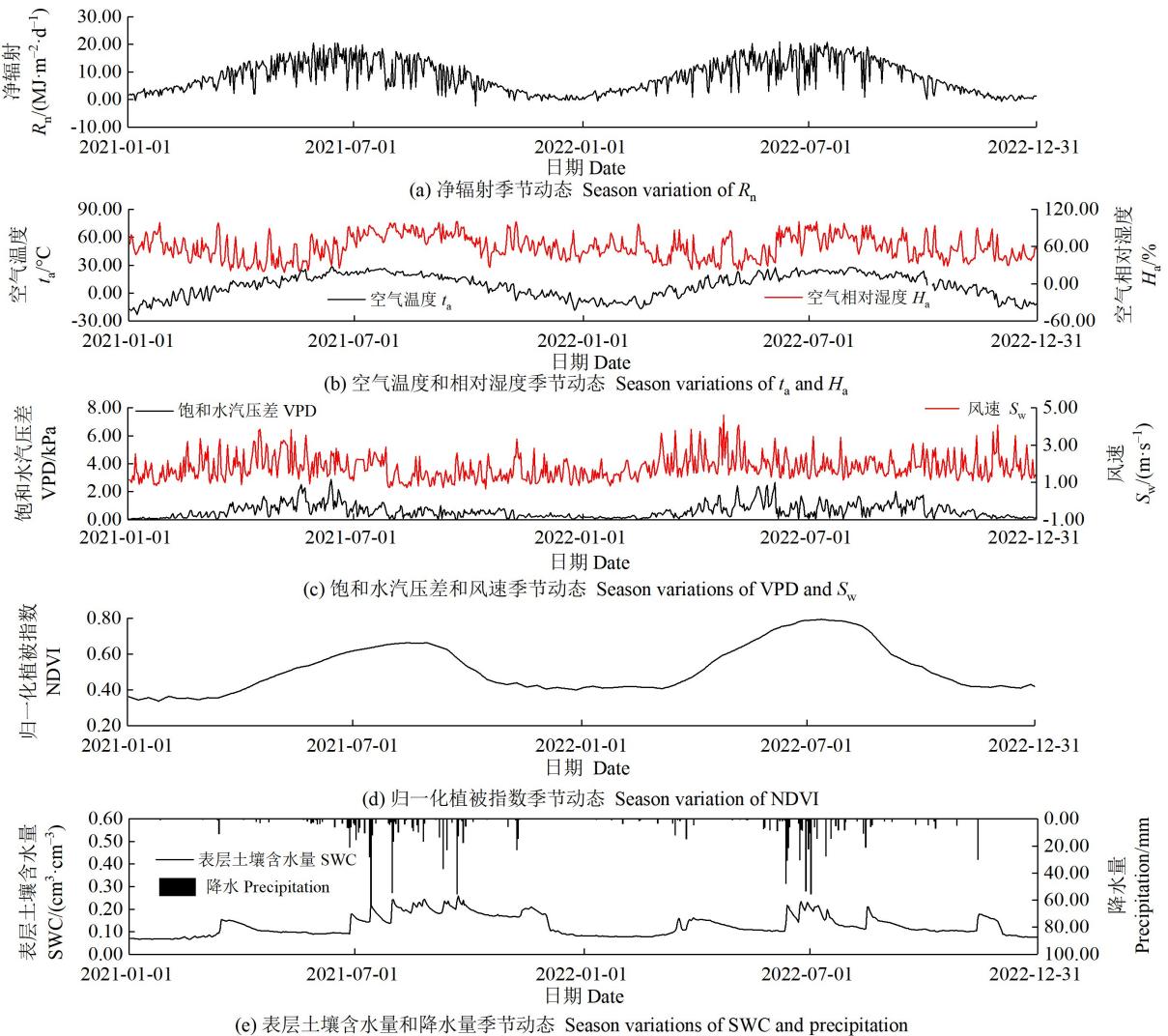


图 1 2021、2022 年樟子松人工林环境要素季节变化

Figure 1 Seasonal variations of environmental factors in the *P. sylvestris* var. *mongolica* plantation in 2021 and 2022

2.2 蒸散动态变化与水量平衡

2021、2022 年樟子松人工林蒸散和水量平衡情况见图 2。非生长季蒸散数值较小，水分散失主要发生在生长季，2021、2022 年总蒸散分别为 394.93、455.99 mm；2021 年蒸散峰值出现在 8 月初，为

3.52 mm·d⁻¹, 而2022年出现在6月底, 为5.46 mm·d⁻¹。雨季来临前, 降水减蒸散剩余量(precipitation minus evapotranspiration, P-ET) 出现全年最小值, 2021、2022年分别为-86.69、-41.00 mm。2021、2022年总降水量远大于研究区年平均降水量(440 mm), 总降水减蒸散剩余量分别为237.87、119.11 mm, 蒸散与降水比分别为0.62、0.79。

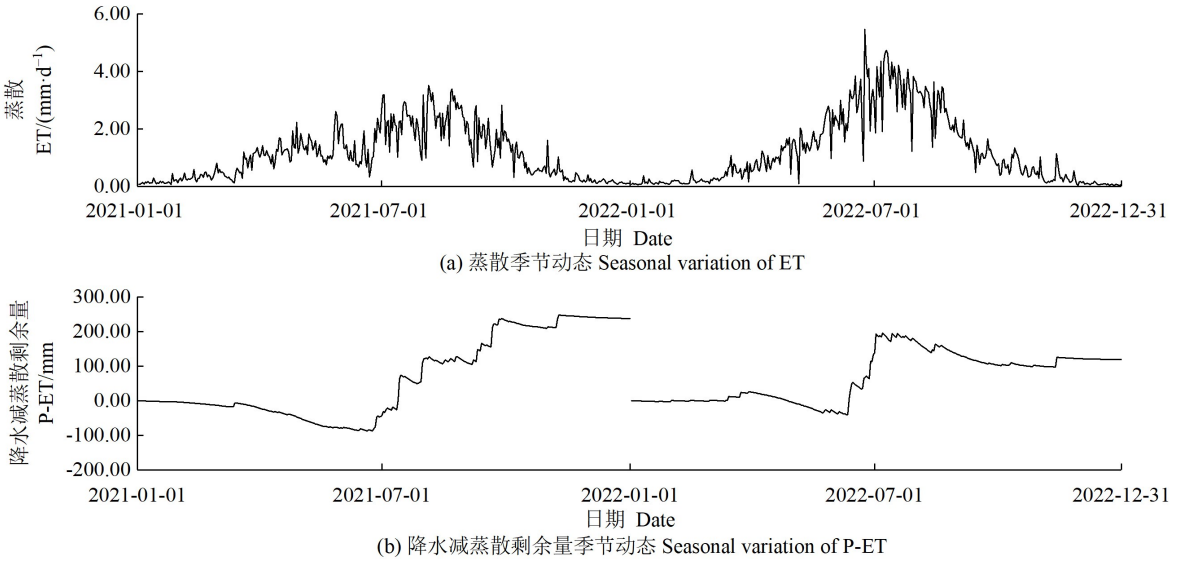


图2 2021、2022年樟子松人工林蒸散和水量平衡季节变化

Figure 2 Seasonal variations of evapotranspiration and water balance in the *P. sylvestris* var. *mongolica* plantation in 2021 and 2022

图3显示不同时期蒸散日动态, 均在上午快速上升而下午快速下降, 中午取得全天最大值, 且非生长季日内变化幅度最小。尽管2021、2022年蒸散日动态峰值均在7月, 但前者远小于后者, 分别为0.71、1.15×10⁻⁴ mm·s⁻¹。

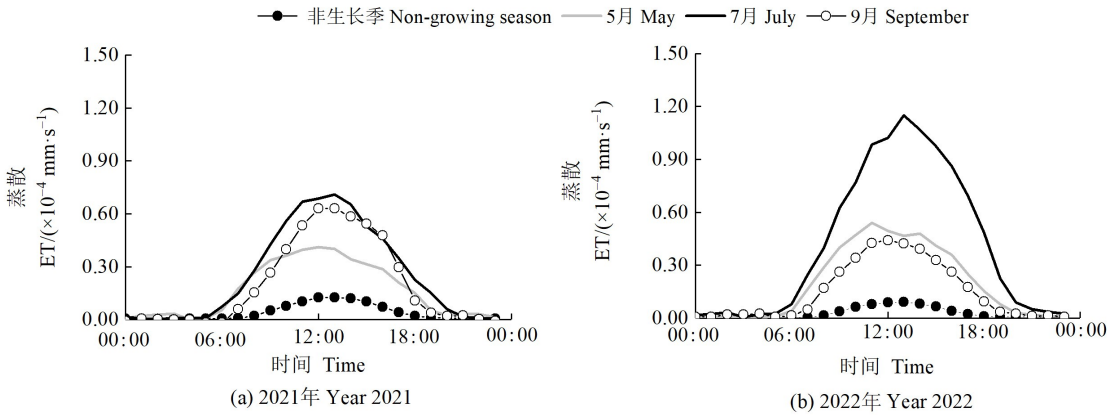


图3 2021、2022年不同时期樟子松人工林蒸散平均日动态

Figure 3 Mean daily dynamics of evapotranspiration in the *P. sylvestris* var. *mongolica* plantation during different periods in 2021 and 2022

2.3 环境要素对蒸散的影响

2021、2022年生长季, 在0.01极显著水平上对蒸散产生重要影响的环境要素完全一致, 均为净辐射、空气温度、空气相对湿度、表层土壤含水量和归一化植被指数。2a生长季内, 净辐射对蒸散的影响均以直接效应为主; 空气温度对蒸散的影响主要为通过净辐射和归一化植被指数的间接效应; 空气相对湿度对蒸散的影响主要为间接效应, 2021年主要通过饱和水汽压差、表层土壤含水量和归一化植被指数产生, 而2022年仅为归一化植被指数。2021年生长季表层土壤含水量对蒸散的影响主要为直接效应, 但2022年主要为通过净辐射和归一化植被指数的间接效应。2a生长季内, 归一化植被指数对蒸散影响的间接效应均超过直接效应, 2021年的间接效应主要通过净辐射、空气温度和表层土壤含水量产生, 而2022年为净辐射和空气温度(表1)。

表1 2021、2022年樟子松人工林生长季环境要素对蒸散的影响

Table 1 Effects of environmental factors on ET in the *P. sylvestris* var. *mongolica* plantation in the growing seasons of 2021 and 2022

年份 Year	环境要素 Environmental factor	相关系数 Correlation coefficient	直接效应 Direct effect	间接效应 Indirect effect						
				净辐射 R_n	空气温度 t_a	空气相对湿度 H_a	饱和水汽压差 VPD	风速 S_w	表层土壤含水量 量 SWC	归一化植被指数 NDVI
2021	净辐射 R_n	0.45 **	0.62		0.10	0.05	-0.30	0.01	-0.09	0.05
	空气温度 t_a	0.46 **	0.21	0.30		-0.06	-0.16	0.00	0.01	0.15
	空气相对湿度 H_a	0.42 **	-0.17	-0.17	0.08		0.37	-0.03	0.21	0.13
	饱和水汽压差 VPD	-0.16	-0.52	0.36	0.07	0.12		0.02	-0.19	-0.03
	风速 S_w	-0.13	0.08	0.07	0.01	0.06	-0.16		-0.15	-0.05
	表层土壤含水量 SWC	0.40 **	0.31	-0.18	0.01	-0.11	0.31	-0.04		0.09
	归一化植被指数 NDVI	0.63 **	0.19	0.17	0.17	-0.12	0.09	-0.02	0.15	
2022	净辐射 R_n	0.73 **	0.41		0.07	0.00	-0.02	0.00	0.04	0.23
	空气温度 t_a	0.71 **	0.15	0.20		0.03	-0.02	0.00	0.05	0.30
	空气相对湿度 H_a	0.42 **	0.11	-0.02	0.05		0.03	0.00	0.05	0.20
	饱和水汽压差 VPD	0.07	-0.04	0.14	0.06	-0.07		0.00	-0.03	0.01
	风速 S_w	-0.09	0.01	-0.04	0.00	-0.01	-0.01		0.00	-0.04
	表层土壤含水量 SWC	0.55 **	0.13	0.12	0.05	0.04	0.01	0.00		0.20
	归一化植被指数 NDVI	0.86 **	0.40	0.24	0.11	0.05	0.00	0.00	0.06	

注: **表示在0.01水平上相关性极显著。Note: ** indicates highly significant correlation at the 0.01 level.

2.4 表面参数动态变化

2021、2022年樟子松人工林表面参数季节变化见图4。4种表面参数在生长季内动态变化基本与日蒸散变化一致,均呈现先增大后减小的趋势,非生长季的4种表面参数均保持在相对较小的数值,且降水之后均有明显增大现象。2021年生长季内,冠层导度、作物系数、Priestley-Taylor系数和耦合系数月平均最大值发生在8月或9月,分别为7.48 mm·s⁻¹、0.78、0.67和0.31,但2022年生长季内,最大值均出现在7月,分别为9.11 mm·s⁻¹、0.80、0.69和0.35。

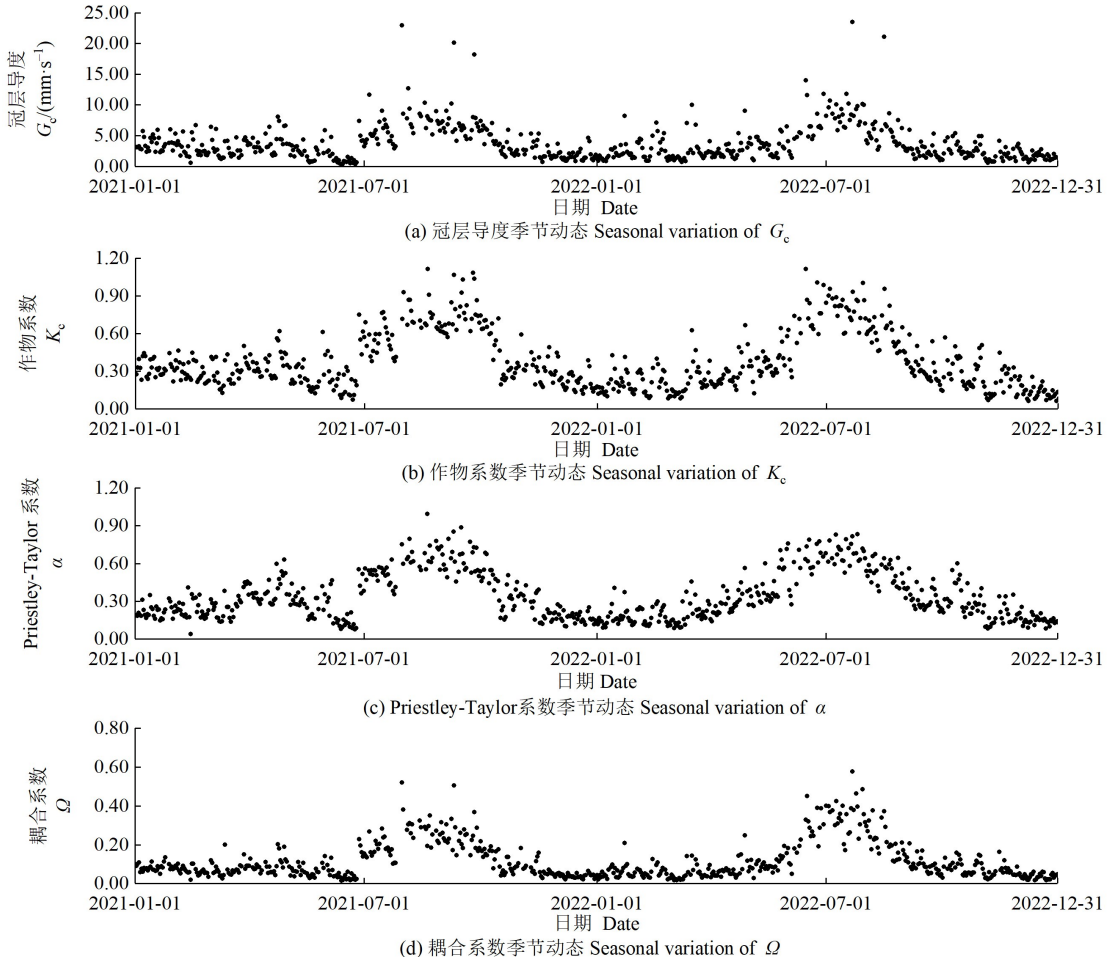


图4 2021、2022年樟子松人工林表面参数季节变化

Figure 4 Seasonal variations of surface parameters in the *P. sylvestris* var. *mongolica* plantation in 2021 and 2022

图 5 显示, 在不同时期, 冠层导度从清晨开始均有快速增大现象, 随后逐渐减小直至傍晚; 作物系数在清晨均会快速减小, 然后基本保持稳定, 到傍晚时略微增大; Priestley-Taylor 系数在清晨之后均会略微减小, 中午前后总体保持稳定, 在傍晚快速增大; 耦合系数在全天则一直表现为逐渐减小的趋势。

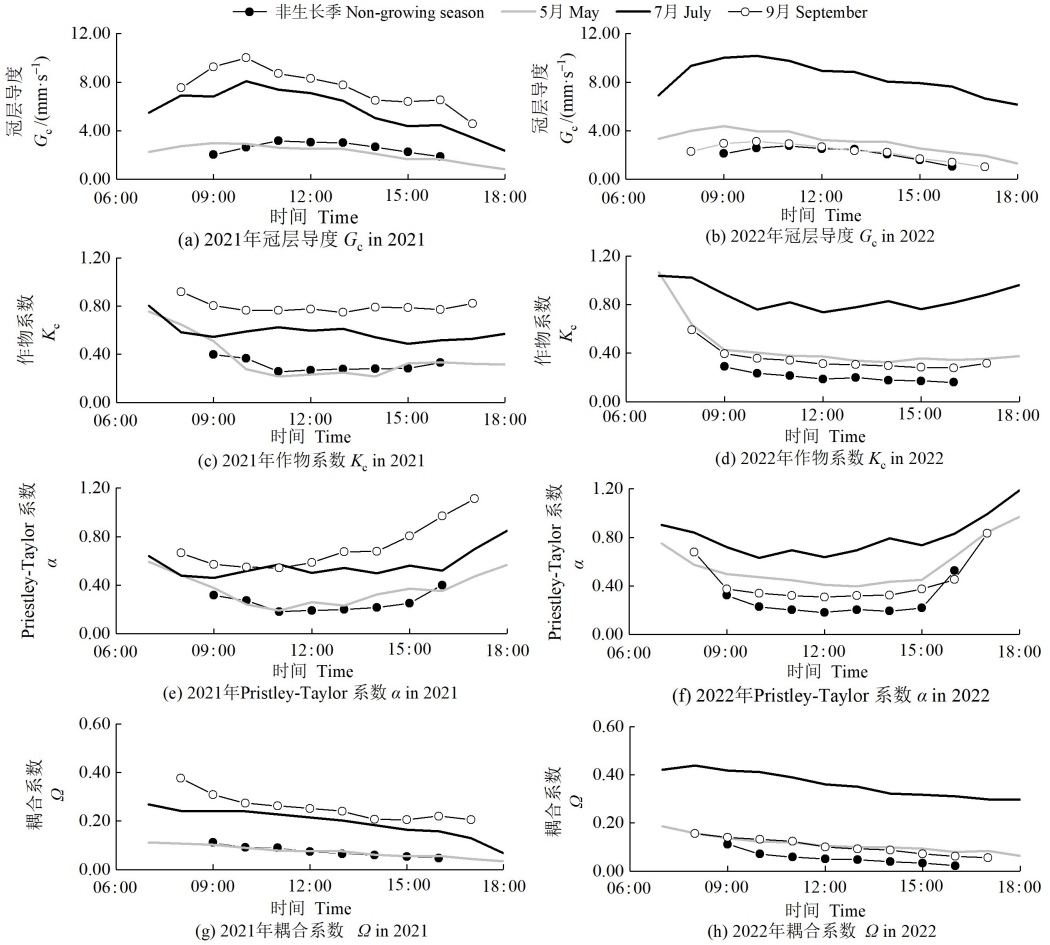


图 5 2021、2022 年不同时期樟子松人工林表面参数平均日动态

Figure 5 Mean daily dynamics of surface parameters in the *P. sylvestris* var. *mongolica* plantation during different periods in 2021 and 2022

2021、2022 年樟子松人工林冠层导度与作物系数、Priestley-Taylor 系数、耦合系数均呈现指数关系 (图 6)。当冠层导度小于 $10 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ 时, 作物系数、Priestley-Taylor 系数、耦合系数均随着冠层导度的增大而快速增大; 当冠层导度大于 $10 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ 时, 作物系数、Priestley-Taylor 系数、耦合系数对冠层导度不敏感, 且随冠层导度增大的阈值分别为 1.09、0.80、0.66。

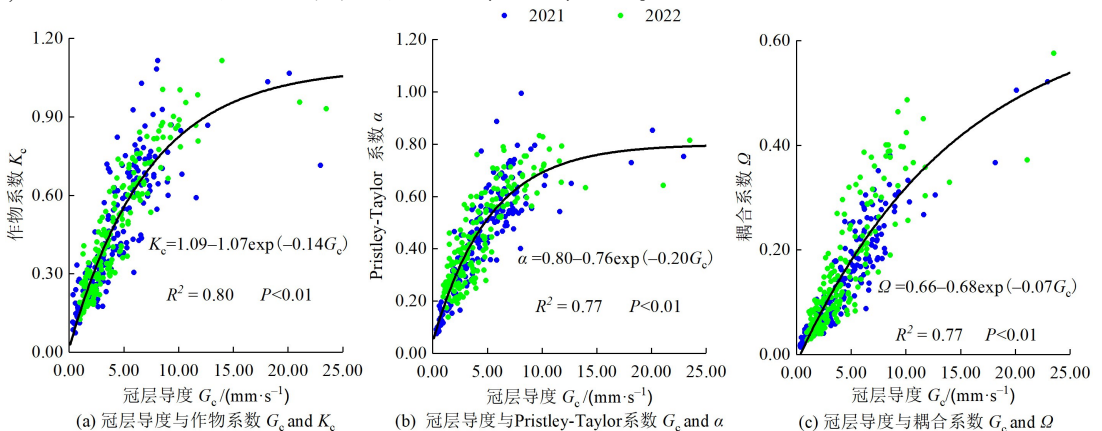
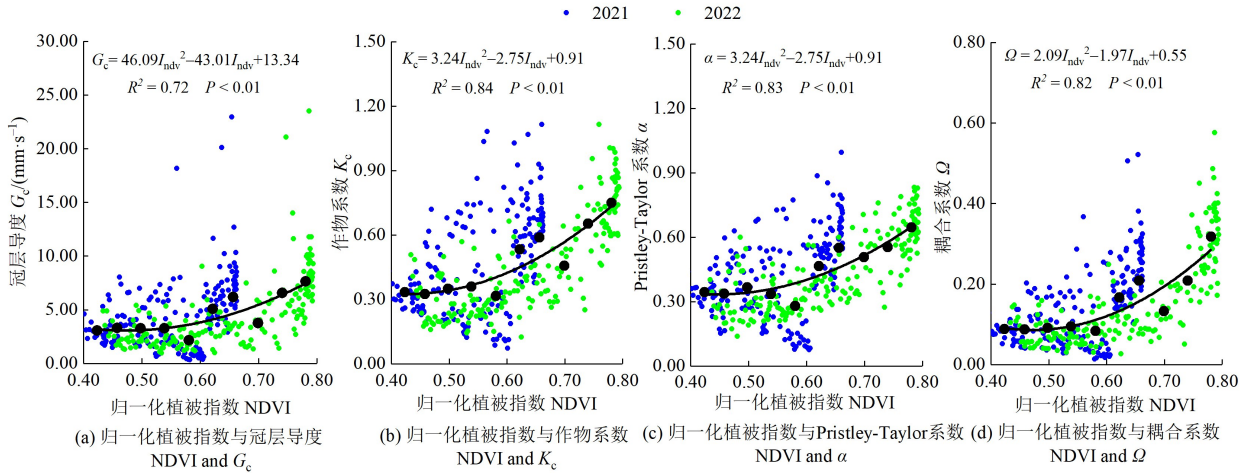


图 6 2021、2022 年樟子松人工林冠层导度与其他表面参数的关系

Figure 6 Relationships between canopy conductance and other surface parameters in the *P. sylvestris* var. *mongolica* plantation in 2021 and 2022

2.5 表面参数对植被绿色度、大气和土壤水分的响应

2021、2022年樟子松人工林归一化植被指数与4种表面参数均呈现二次曲线关系，即当归一化植被指数小于0.55时，4种表面参数均对归一化植被指数不敏感；当归一化植被指数大于0.55时，4种表面参数均随归一化植被指数增大而快速增大(图7)。

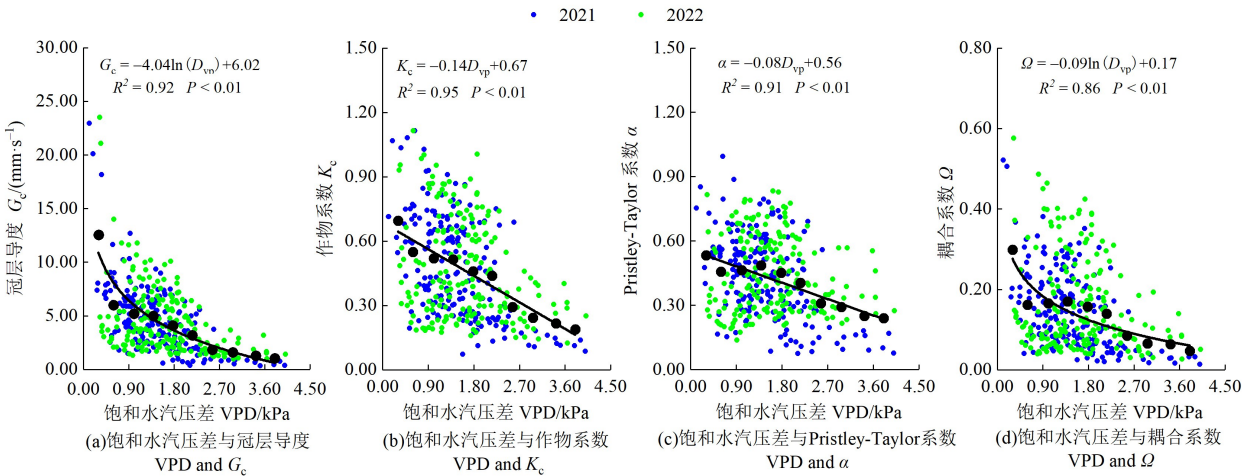


注：黑色数据点为表面参数每0.04归一化植被指数间隔的平均值。Note: the surface parameters were bin-averaged into 0.04 normalized difference vegetation index increments.

图7 2021、2022年樟子松人工林归一化植被指数与表面参数的关系

Figure 7 Relationships between normalized difference vegetation index and surface parameters in the *P. sylvestris* var. *mongolica* plantation in 2021 and 2022

大气水分状况对4种表面参数均有明显抑制作用，但饱和水汽压差与4种表面参数间的数学关系并不相同，冠层导度、耦合系数与饱和水汽压差呈对数关系减小，即饱和水汽压差较小时，冠层导度、耦合系数减小的速度大于饱和水汽压差较大时；而作物系数、Priestley-Taylor系数与饱和水汽压差呈线性关系减小，斜率分别为-0.14、-0.08(图8)。

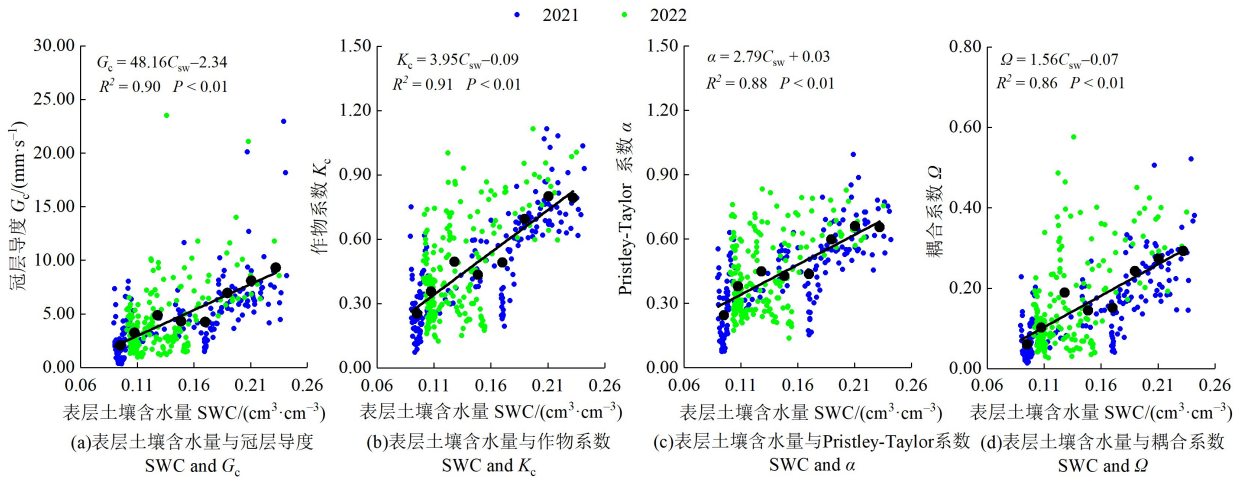


注：黑色数据点为表面参数每0.40kPa饱和水汽压差间隔的平均值。Note: the surface parameters were bin-averaged into 0.4 vapor pressure deficit increments.

图8 2021、2022年樟子松人工林饱和水汽压差与表面参数的关系

Figure 8 Relationships between vapor pressure deficit and surface parameters in the *P. sylvestris* var. *mongolica* plantation in 2021 and 2022

土壤水分状况的改善均会引起4种表面参数的线性增大，表层土壤含水量对冠层导度、作物系数、Priestley-Taylor系数、耦合系数的斜率分别为48.16、3.95、2.79、1.56(图9)。



注: 黑色数据点为表面参数每 0.02 cm³·cm⁻³ 表层土壤含水量间隔的平均值。Note: the surface parameters were bin-averaged into 0.02 top soil water content increments.

图9 2021 和 2022 年樟子松人工林表层土壤含水量与表面参数的关系

Figure 9 Relationships between top soil water content and surface parameters in the *P. sylvestris* var. *mongolica* plantation in 2021 and 2022

3 讨论与结论

气候、土壤、植被特征和管理措施不同通常会导致年蒸散出现差异^[6,8]。本研究中, 2021、2022 年樟子松人工林水分耗散量分别为 394.93、455.99 mm, 此数值与内蒙古典型温带草原和当地油松人工林接近^[6,20], 低于河南栓皮栎人工林和北京杨树人工林^[21-22], 高于宁夏半干旱灌丛和内蒙古荒漠草原^[1,20]。年蒸散与降水比在量化土地利用和气候变化对区域水文的影响方面是一个极具价值的指标。本研究中, 蒸散与降水比在 2021、2022 年分别为 0.62、0.79, 与多个温带森林生态系统中的结果(0.67~0.86)相近^[6,9,23], 但低于当地自然生态系统(典型草原和草甸草原)中的结果(1.00~1.19)^[20]。这说明在本研究区域栽植樟子松人工林比当地自然生态系统更能积累可用水资源。但是, 当地未来气候具有更加干暖化的趋势^[6], 樟子松人工林耗水量可能会增加, 从而削弱该林分在当地水文循环中的正效益。2021、2022 年积累降水减蒸散剩余量的最小值分别为 -86.69、-41.00 mm, 说明辽宁西部樟子松人工林每年都会使用上一年积累下来的水分。在半干旱地区, 土壤水分的年际遗留对人工林度过雨季来临前的干旱时期至关重要^[22]。大量研究^[8-9,24]证明在干旱和半干旱地区年蒸散随年降水增加而增加, 但是本研究中 2 a 的观测结果与此相反。主要原因为 2021 年雨季比 2022 年来临的晚, 同时结束的也晚, 且 2021 年遗留了 237.87 mm 水量, 导致 2022 年植被建成更好, 故而引发了本研究中樟子松人工林更大的年耗水量, 同时也说明干旱和半干旱地区年降水量和年内降水分配对年蒸散都至关重要。当然, 进一步明确降水的年际遗留效应对本研究中樟子松人工林蒸散的年际变化的作用还需要进行多年连续观测。

在森林生态系统中, 植被绿度、土壤水分、太阳辐射和空气温度对蒸散通常具有明显的促进作用^[6,25-26], 在本研究中同样如此。2021、2022 年生长季内, 净辐射对蒸散的影响以直接效应为主, 表明了能量供应对辽宁西部樟子松人工林水分耗散的重要作用; 而空气温度、空气相对湿度对蒸散的影响以间接效应为主, 说明空气温度、空气相对湿度对樟子松人工林水分耗散的作用依赖其他环境要素。2 a 生长季内, 归一化植被指数与蒸散之间的相关系数相较其他环境要素的大, 说明植被绿度主导了本研究区樟子松人工林水分耗散。尽管森林生态系统往往具有较深的根系分布, 但是有多个森林生态系统已采用表层土壤含水量指示干旱, 表明表层土壤含水量对森林整个吸水土层的水分状态具有一定的指示作用^[4,23]。本研究中, 2 a 生长季表层土壤含水量对蒸散的影响均达到显著水平, 表明在辽宁西部樟子松人工林中表层土壤含水量同样对根区土壤供水能力具有一定代表性。但 2021 年生长季表层土壤含水量对蒸散的影响以直接效应为主, 而 2022 年以间接效应为主, 可能是因为 2021 年雨季来临较晚, 雨热错位, 凸显了表层土壤含水量的直接效应。

在温带生态系统中, 表面参数与蒸散具有相似季节动态, 且表面参数数值大小在一定程度上可表征

蒸散强弱^[1,6,24]。本研究中,樟子松人工林冠层导度、Priestley-Taylor系数、耦合系数月峰值小于拥有较高蒸散的山地茶园和针阔叶混交林^[27-28],大于拥有较低蒸散的半干旱区灌木林和草原生态系统^[1,29]。当耦合系数趋近于1时,净辐射是蒸散的主导因素;当耦合系数趋近于0时,蒸散主要受饱和水汽压差和冠层导度控制^[24]。本研究中,日耦合系数数值总体上小于0.50,说明辽宁西部樟子松人工林总体上能量供应充足,植被状态和大气蒸发力主导水分散失。在农田生态系统中,作物系数常用来指导制定灌溉制度,因其也可以用来模拟蒸散^[28],近年来在自然生态系统中也得到了越来越多的关注^[6,9]。根据Priestley-Taylor系数、作物系数的计算公式,实际上Priestley-Taylor系数、作物系数分别为蒸散相对平衡蒸散量、参考作物蒸散量的数值,内蒙古河套灌区农田和山地茶园等水分供应充足的生态系统生长旺盛期日Priestley-Taylor系数、作物系数数值远大于本研究中的相应结果^[28,30],说明尽管2 a研究期内降水相对丰沛,但辽宁西部樟子松人工林的耗水强度依然相对较低。

在陆面过程研究中,作物系数、Priestley-Taylor系数、耦合系数随着冠层导度升高而呈现指数增大,指示下垫面地气交换强度受到植被生理和物候的强烈支配^[1,6,24,29],本研究中的樟子松人工林观测结果同样具有这种现象。在小于冠层导度的阈值时,其表面参数随冠层导度增大快速增大,指示在此范围内下垫面蒸散受冠层导度强烈控制,本研究中冠层导度阈值为 $10 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ 。理论研究^[9]表明,在冠层充分发展的生态系统中,当冠层导度大于 $16 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ 时,Priestley-Taylor系数才会对冠层导度不敏感,而且本研究中Priestley-Taylor系数渐进值小于供水充足生态系统的参考值1.26^[19]。本研究中较小的冠层导度阈值和Priestley-Taylor系数渐进值说明辽宁西部樟子松人工林是一个冠层稀疏的水分限制生态系统。

在多种生态系统中,植被绿度、土壤和大气水分状态对表面参数的季节动态均具有强烈的控制作用^[1,6,27,29]。本研究中,当归一化植被指数大于0.55时,表面参数随归一化植被指数线性增大,说明辽西樟子松人工林绿度在下垫面发展过程中扮演重要角色。值得注意的是,本研究中表面参数在归一化植被指数小于0.55时对归一化植被指数不敏感,主要原因是归一化植被指数较小时通常伴随土壤和大气水分亏缺,特别是生长季前期,掩盖了归一化植被指数对表面参数的作用。与多数水分限制生态系统研究^[1,7]一致,本研究中饱和水汽压差与冠层导度之间也存在明显的负相关,即随着大气水分亏缺加重樟子松人工林气孔逐渐关闭,从而降低地气交换强度,进而引起作物系数、Priestley-Taylor系数、耦合系数减小。本研究中表面参数均随表层土壤含水量升高而线性增大,与半干旱区灌丛中的结果一致^[1],说明土壤水分同样是控制辽宁西部樟子松人工林气孔行为的关键因素,进而影响地气交换。值得注意的是,有研究^[1,6]认为,在表层土壤含水量一定范围内表面参数均随表层土壤含水量升高而增大,超过表层土壤含水量的阈值,表面参数将不再受表层土壤含水量控制。本研究中并未出现这种情况,主要原因是2 a研究期内观测到的表层土壤含水量最大值为 $0.26 \text{ cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$,而此值可能还未达到樟子松生理活性对土壤水分不敏感临界值的临界值,当然这还需要多年的连续观测才能确定。

本研究对辽宁西部樟子松人工林蒸散和环境要素进行了2 a连续观测,发现:2021、2022年樟子松人工林年蒸散均小于降水,指示其具有一定的水源涵养作用。2 a生长季内,净辐射、空气温度、空气相对湿度、表层土壤含水量、归一化植被指数均对蒸散季节动态具有重要影响,且归一化植被指数一直为控制水分散失的最关键环境要素。不同时期,作物系数、Priestley-Taylor系数日内变化相似,均在清晨和傍晚出现上翘,冠层导度则在上午出现峰值,而耦合系数一直表现为减小趋势。作物系数、Priestley-Taylor系数、耦合系数均随冠层导度升高而呈指数关系增大,且冠层导度阈值为 $10 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ 。归一化植被指数对冠层导度、作物系数、Priestley-Taylor系数、耦合系数的影响存在阈值(0.55),高于此阈值,4种表面参数才会随归一化植被指数增大而快速增大;冠层导度和耦合系数对饱和水汽压差响应与作物系数和Priestley-Taylor系数不同,前者呈对数减小,而后者为线性减小;表层土壤含水量对4种表面参数影响规律一致,即均呈正线性关系。

致谢:感谢河南小浪底森林生态系统国家野外科学观测研究站为本研究提供通量与微气象观测设备。

参考文献

- [1] JIA X, ZHA T S, GONG J N, *et al.* Energy partitioning over a semi-arid shrubland in northern China[J]. *Hydrological Processes*, 2016, 30(6): 972-985.

- [2] 杨丽, 毛梦圆, 郭嘉龙, 等. 杉木不同冠层高度的水力结构和光合特性[J]. 森林与环境学报, 2024, 44(5): 468-475.
- [3] 赵娜, 刘诗莹, 李少宁, 等. 北京典型绿化树种幼苗对干旱-复水的光合生理响应[J]. 森林与环境学报, 2022, 42(4): 374-383.
- [4] GAO X, SUN S J, MENG P, *et al.* Carbon fluxes and water-use efficiency in a *Pinus tabulaeformis* plantation in Northeast China and their relationship to drought[J]. *Science of the Total Environment*, 2024, 946: 174-258.
- [5] FAN R X, SUN M Y, ZHU X J, *et al.* Eddy covariance measurement-based differences in annual evapotranspiration between forests and grasslands in China[J]. *Frontiers in Plant Science*, 2022, 13: 1 030 929.
- [6] GAO X, ZHANG J S, CAI J F, *et al.* Surface energy partitioning and evapotranspiration in a *Pinus tabulaeformis* plantation in Northeast China[J]. *Frontiers in Plant Science*, 2023, 14: 1 048 828.
- [7] ZHU G F, LU L, SU Y H, *et al.* Energy flux partitioning and evapotranspiration in a sub-alpine spruce forest ecosystem[J]. *Hydrological Processes*, 2014, 28(19): 5 093-5 104.
- [8] XIAO J F, SUN G, CHEN J Q, *et al.* Carbon fluxes, evapotranspiration, and water use efficiency of terrestrial ecosystems in China[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2013, 182/183: 76-90.
- [9] GAO X, DU Z Y, YANG Q S, *et al.* Energy partitioning and evapotranspiration in a black locust plantation on the Yellow River Delta, China[J]. *Journal of Forestry Research*, 2022, 33(4): 1 219-1 232.
- [10] 潘雨梦, 肖辉杰, 辛智鸣, 等. 乌兰布和沙漠东北缘稀疏灌丛能量平衡及蒸散特征[J]. 生态与农村环境学报, 2022, 38(11): 1 447-1 455.
- [11] 郭沈沈, 吴志祥, 刘文杰, 等. 热带北缘地区橡胶林水分利用效率的季节差异及归因分析[J]. 热带生物学报, 2023, 14(4): 424-432.
- [12] 李传金, 胡顺军, 郑博文. 古尔班通古特沙漠南缘梭梭(*Haloxylon ammodendron*)群落能量平衡及蒸散特征[J]. 生态学报, 2021, 41(1): 92-100.
- [13] 王俐爽, 同小娟, 孟平, 等. 辽西半干旱地区两种典型人工林生态系统能量通量及蒸散特征[J]. 植物生态学报, 2022, 46(12): 1 508-1 522.
- [14] WANG L, LIU Z B, GUO J B, *et al.* Estimate canopy transpiration in larch plantations via the interactions among reference evapotranspiration, leaf area index, and soil moisture[J]. *Forest Ecology and Management*, 2021, 481: 118-127.
- [15] 高翔, 周宇, 孟平, 等. 辽西樟子松人工林净生态系统碳交换[J]. 应用生态学报, 2022, 33(5): 1 183-1 190.
- [16] KLJUN N, CALANCA P, ROTACH M W, *et al.* A simple parameterisation for flux footprint predictions[J]. *Boundary-Layer Meteorology*, 2004, 112(3): 503-523.
- [17] TWINE T E, KUSTAS W P, NORMAN J M, *et al.* Correcting eddy-covariance flux underestimates over a grassland[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2000, 103(3): 279-300.
- [18] ZHANG Y Y, ZHAO W Z, HE J H, *et al.* Energy exchange and evapotranspiration over irrigated seed maize agroecosystems in a desert-oasis region, northwest China[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2016, 223: 48-59.
- [19] PRIESTLEY C H B, TAYLOR R J. On the assessment of surface heat flux and evaporation using large-scale parameters[J]. *Monthly Weather Review*, 1972, 100(2): 81-92.
- [20] LI H D, WANG A Z, YUAN F H, *et al.* Evapotranspiration dynamics over a temperate meadow ecosystem in eastern inner Mongolia, China[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2016, 75(11): 978.
- [21] 王音, 同小娟, 张劲松, 等. 干旱对栓皮栎人工林碳水通量及其耦合的影响[J]. 植物生态学报, 2024, 48(9): 1 157-1 171.
- [22] MA J Y, ZHA T S, JIA X, *et al.* Energy and water vapor exchange over a young plantation in northern China[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2018, 263: 334-345.
- [23] MA J Y, JIA X, ZHA T S, *et al.* Ecosystem water use efficiency in a young plantation in Northern China and its relationship to drought[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2019, 275: 1-10.
- [24] YUE P, ZHANG Q, ZHANG L, *et al.* Long-term variations in energy partitioning and evapotranspiration in a semiarid grassland in the Loess Plateau of China[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2019, 278: 107-116.
- [25] 刘浩, 张秋良. 兴安落叶松林生长季蒸散量特征[J]. 中南林业科技大学学报, 2021, 41(3): 149-156.
- [26] 王云霓, 曹恭祥, 徐丽宏, 等. 内蒙古大青山华北落叶松人工林蒸散特征及其影响因子[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2023, 47(4): 148-156.
- [27] YAN C H, ZHAO W L, WANG Y, *et al.* Effects of forest evapotranspiration on soil water budget and energy flux partitioning in a subalpine valley of China[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2017, 246: 207-217.
- [28] PANG J P, LI H P, YU F H, *et al.* Environmental controls on water use efficiency in a hilly tea plantation in southeast China[J]. *Agricultural Water Management*, 2022, 269: 107-116.
- [29] CHEN S P, CHEN J Q, LIN G H, *et al.* Energy balance and partition in inner Mongolia steppe ecosystems with different land use types[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2009, 149(11): 1 800-1 809.
- [30] ZHANG Y, HAN W T, ZHANG H H, *et al.* Evaluating maize evapotranspiration using high-resolution UAV-based imagery and FAO-56 dual crop coefficient approach[J]. *Agricultural Water Management*, 2023, 275: 108-117.