

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2024.04.012.

马军, 韩磊, 周鹏, 等. 基于 Gash 修正模型与神经网络优化模型的刺槐冠层截留模拟[J]. 水土保持研究, 2024, 31(4): 188-196.

Ma Jun, Han Lei, Zhou Peng, et al. Simulation of *Robinia pseudoacacia* Canopy Interception Based on Modified Gash Model and Neural Network Model[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2024, 31(4): 188-196.

基于 Gash 修正模型与神经网络优化模型的 刺槐冠层截留模拟

马军¹, 韩磊^{2,3,4}, 周鹏¹, 柳利利^{2,3,4}, 王娜娜^{2,3,4}, 马云蕾^{2,3,4}

(1.宁夏大学 林业与草业学院, 银川 750021; 2.宁夏大学 地理科学与规划学院, 银川 750021;
3.中阿旱区特色资源与环境治理国际合作联合实验室, 银川 750021; 4.宁夏旱区资源评价与环境调控重点实验室, 银川 750021)

摘 要:[目的]对比分析 Gash 修正模型和神经网络模型在模拟和预测人工林冠层截留的适用性, 揭示干旱区刺槐冠层截留及其响应过程, 为深入了解森林生态水文过程及其调控机制提供科学依据。[方法]于 2019 年 5—10 月, 以宁夏河东地区刺槐(*Robinia pseudoacacia*)人工林为研究对象, 定位观测了树干茎流和穿透雨并计算得到冠层截留, 采用修正后的 Gash 模型与神经网络模型对刺槐林冠层截留量进行了模拟。[结果](1) 研究区刺槐人工林的穿透雨量、树干茎流量、林冠截留量分别为 154.19, 5.61, 16.5 mm, 产生穿透雨和树干茎流的阈值分别为 1.37, 2.17 mm。(2) Gash 修正模型和优化后的神经网络模型均能较好地模拟刺槐冠层截留量, Gash 修正模型的绝对误差、均方误差、均方根误差、平均绝对百分比误差分别为 0.20%, 0.06%, 0.24%, 52.43%, 模拟结果拟合精度达到 83%; 与 Gash 修正模型相比, 采用麻雀搜索算法优化后的 BP 神经网络算法模型(SSA-BP), 均方误差降低了 61.48%, 平均绝对误差降低了 40.39%, 均方根误差降低了 37.93%, 平均绝对百分比误差降低了 50.52%, 决定系数提高了 1.2%。[结论]在林木冠层截留模拟研究方面, 加入麻雀搜索算法后的 BP 神经网络模型具有较好的可靠性, 可以有效降低模拟误差, 提高模型的预测精度。

关键词:冠层截留; 修正后 Gash 模型; 神经网络模型; 麻雀搜索算法; 刺槐林

中图分类号:S792.26; S715.2

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2024)04-0188-09

Simulation of *Robinia pseudoacacia* Canopy Interception Based on Modified Gash Model and Neural Network Model

Ma Jun¹, Han Lei^{2,3,4}, Zhou Peng¹, Liu Lili^{2,3,4}, Wang Nana^{2,3,4}, Ma Yunlei^{2,3,4}

(1.College of Forestry and Prataculture, Ningxia University, Yinchuan 750021, China; 2.School of Geography and Planning, Ningxia University, Yinchuan 750021, China; 3.China-Arab Joint International Research Laboratory for Featured Resources and Environmental Governance in Arid Regions, Yinchuan 750021, China; 4.Key Laboratory of Resource Evaluation and Environmental Regulation in Arid Region of Ningxia, Yinchuan 750021, China)

Abstract:[Objective] The aims of this study are to compare and analyze the applicability of modified Gash model and neural network model in simulating and predicting canopy interception of artificial forest to reveal the canopy interception and its response process of *Robinia pseudoacacia* in arid area, and to provide scientific basis for further understanding of forest eco-hydrological process and its regulation mechanism. [Method] *Robinia pseudoacacia* plantation in the east of the Yellow River of Ningxia was taken as the research object, the stemflow and throughfall were observed and the canopy interception was calculated. The modified Gash model and neural network model were used to simulate the canopy interception of *Robinia*

收稿日期:2023-07-26

修回日期:2023-08-29

资助项目:宁夏自然科学基金(2023AAC03056);国家自然科学基金(31760236);宁夏大学研究生创新项目(CXXM2023-06)

第一作者:马军(1995—),男,宁夏中卫人,硕士研究生,研究方向水土保持与荒漠化防治。E-mail:majun0079@163.com

通信作者:韩磊(1985—),男,宁夏石嘴山人,博士,研究员,主要从事生态水文过程研究。E-mail:layhan@163.com

<http://stbcyj.paperonce.org>

pseudoacacia forest. [Result] (1) The throughfall, stemflow and canopy interception of *Robinia pseudoacacia* plantation in the study area were 154.19 mm, 5.61 mm and 16.5 mm, respectively, and the thresholds for throughfall and stemflow were 1.37 mm and 2.17 mm, respectively. (2) Both the Gash modified model and the optimized neural network model could better simulate the canopy interception of *Robinia pseudoacacia*. The absolute error, mean square error, root mean square error and mean absolute percentage error of the Gash modified model were 0.20%, 0.06%, 0.24% and 52.43%, respectively. The fitting accuracy of the simulation results reached 83%. Compared with the Gash modified model, the mean square error of the BP neural network algorithm model (SSA-BP) optimized by the sparrow search algorithm was reduced by 61.48%, the mean absolute error was reduced by 40.39%, the root mean square error was reduced by 37.93%, the mean absolute percentage error was reduced by 50.52%, and the coefficient of determination was increased by 1.2%. [Conclusion] In the simulation study of canopy interception, the BP neural network model with sparrow search algorithm has a good reliability, which can effectively reduce the simulation error and improve the prediction accuracy of the model.

Keywords: canopy interception; modified Gash model; neural network model; sparrow search algorithm; *Robinia pseudoacacia*

降雨是水文过程中水分输入的主要方式。降雨再分配过程包括穿透雨、树干茎流和树冠截留,改变了降水的量、强度、分布及动能等特征,进而深刻影响着森林系统内的渗透、侵蚀、土壤水分分布、表面层径流和洪水的发生等一系列生态水文过程^[1-2]。此外,在全球气候变暖的背景下,降雨格局正发生着改变,降雨作为干旱地区植被生长的主要水分来源,其再分配机制影响着区域的水量平衡^[3]。冠层截留一定程度上减少了土壤水分的输入,进一步加剧了水资源供需矛盾。因此,研究树冠对降雨的拦截效应,并建立有效的模型进行预测,可以为区域人工林林分结构调整和水资源的管理提供科学依据^[4]。在植被冠层截留的定量研究方面,林冠截留模型方法被认为是估算和预测冠层截留量及其组分构成的有效工具^[5]。目前树冠截留模型主要有经验模型、半经验半理论模型和理论模型,其中半经验半理论的 Gash 模型结合了经验模型和理论模型的优势,能够描述影响林冠截留的各种因子和截留量的关系,得到广泛应用^[6-7]。Gash 修正模型则在 Gash 模型的基础上进一步强调气象条件、模型边界差等问题并进行了修正^[7],目前修正后的 Gash 模型适用性更强,能模拟多种林分的林冠截留^[8-12]。Gash 修正模型对加入模型的指标测量精度要求较高,需要减小模型参数带来的误差,以降低模型的不确定性^[13]。

BP 神经网络(back propagation neural network, BPNN),具有自适应学习、非线性映射的优势,通过学习找出输入值与输出值之间的规律,可以更好地解释变量的复杂关系^[14]。被越来越多地应用于参考作物蒸散量^[15]、林木液流^[16]、林冠蒸腾^[17]、河川径流量

等^[18]水文过程的模拟中。此外,加入优化算法可以增强传统 BP 神经网络的稳定性和预测精度^[18]。与其他智群算法相比,麻雀搜索算法(Sparrow Search Algorithm, SSA)具有局部搜索能力强、全局快速收敛能力、控制参数少、结构清晰、可以得到最优初始权值和阈值等优点^[14],因此,本文将神经网络模型及其优化算法引入到林冠截留过程模拟中,以期更好地解释变量间的复杂联系过程。

本研究于 2019 年 5—10 月,以宁夏河东地区刺槐(*Robinia pseudoacacia*)人工林为研究对象,利用修正后的 Gash 模型结合神经网络模型对林冠截留过程进行模拟,分析刺槐的林冠层降雨再分配特征,并采用麻雀搜索算法对已建立的神经网络预测模型进行优化,为林木冠层截留的模拟预测研究提供新的思路。

1 研究区域与研究方法

1.1 研究区概况

研究区位于宁夏回族自治区灵武市白芨滩(38°03'N, 106°22'E, 海拔 1 105~1 655 m),地处毛乌素沙地西南缘。属温带大陆性气候,年均降雨量 192.9 mm,年均气温为 8.5 °C^[19]。土壤以灰钙土和风沙土为主,自然植被以沙生植物为主,包括沙蓬(*Agriophyllum squarrosum*)、芨芨草(*Achnatherum splendens*)、沙蒿(*Artemisia desertorum*)等,人工植被主要有刺槐、沙枣(*Elaeagnus angustifolia*)、柠条(*Caragana korshinskii*)和花棒(*Hedysarum scoparium*)等。刺槐林龄为 17 a,平均树均高 4.79 m,平均冠幅 7.43 m²,平均胸径 7.37 cm。

1.2 研究方法

1.2.1 气象数据监测 在距离样地 50 m 处的空旷地内安装气象站,采用美国 Vantage Pro 2 自动气象站(Davis Inc, USA)实时监测气象要素,主要包括降雨量(P , mm)、空气温度(T_a , $^{\circ}\text{C}$)、相对湿度(RH , %)、风速(W_v , m/s)、太阳辐射(S_r , W/m^2)、大气压(B_p , kPa)等,每隔 15 min 记录 1 次。

1.2.2 样地选取与调查 在刺槐人工林地设置 3 个 $20\text{ m} \times 20\text{ m}$ 标准样地(表 1)。在样地边缘处设置 RG3-M 翻斗式自记雨量计记录降雨数据,对气象站数据进行校准,并划分次降雨的降雨历时。叶面积指数采用冠层分析仪(LAI-2200, LI-COR Inc., USA)测定,每隔 15 d 测定 1 次。观测时间为 2019 年 5—10 月。

表 1 样木基本特征

Table 1 Basic characteristics of sample wood

样地	株行距/m	树高/m	冠幅/ m^2	胸径/cm	叶面积指数(LAI)
1	3.0×3.0	4.81±0.22	7.00±1.43	7.27±0.62	0.76±0.29
2	3.0×3.0	4.66±0.37	6.79±1.78	7.23±0.51	0.71±0.41
3	3.0×3.0	4.90±0.23	7.18±1.86	7.34±0.39	0.82±0.31

1.2.3 穿透雨和树干茎流收集 在选取的每个样地内,分别采用 6×6 点阵式布设简易雨量桶,放置简易雨量筒观测收集林内穿透雨量。每个样地内选取 10 株长势良好、树干通直的样树,用中部被剖开的 PVC 橡胶管在 1.3 m 处绕树干螺旋向下缠绕,用 U 型针固定橡胶管,并采用玻璃胶将软管和树干的缝隙密封,下接 10 L 集水器,以收集每次降雨之后的树干茎流并进行测定^[9]。具体计算公式如下:

$$T_f = \frac{1}{n} \times \sum_{i=1}^n \frac{T_{fi}}{A_i} \quad (1)$$

$$S_f = \frac{N \times S_a}{A \times 10^3} \quad (2)$$

$$I = P_G - S_f - T_f \quad (3)$$

式中: I 为林冠层的截留量(mm); T_f 为林内穿透雨量(mm); S_f 为树干茎流量(mm); P_G 为林外降雨量(mm); T_{fi} 第 i 个雨量筒中穿透雨体积(mm); A_i 为第 i 个雨量筒的受雨面积(mm^2); N 为样地中林木总棵数; S_a 为平均样树茎流量(ml); A 为样地面积(m^2)。

1.3 修正后 Gash 模型的构建

修正后的 Gash 模型主要包括 3 个阶段:湿润期间总降雨量低于阈值,树冠饱和阶段以及降雨事件后的干燥^[10]。

$$\sum_{j=1}^{m+n} I_j = (1-p-P_t) \sum_{j=1}^m P_{Gj} + \sum_{j=1}^n (P_{Gj} - P'_{Gj}) \\ (cE_c/R_j) + c \sum_{j=1}^n P'_{Gj} + qS_t + P_t \sum_{j=1}^{n-q}$$

$$(1 - \frac{\bar{E}_{cj}}{R_j})(P_{Gj} - P'_{Gj}) \quad (4)$$

$$P'_{Gj} = -\frac{\bar{R}}{E_c} S_c \ln(1 - \frac{\bar{E}_c}{R}) \quad (5)$$

$$P''_{Gj} = \frac{S_t}{P_t} \cdot \frac{\bar{R}}{R - E_c} + P'_{Gj} \quad (6)$$

式中: P'_{Gj} 、 P''_{Gj} 为林冠层达到饱和状态和树干持水能力达到饱和状态所需的最小降雨量; c 为林分郁闭度; n 为使林冠层持水量达到饱和状态的降雨次数; m 为未使林冠层持水量达到饱和的降雨次数; j 为每次降雨事件; q 为产生树干茎流的降雨次数; I 为冠层截留量(mm); p 为自由穿透系数; R 为降雨强度(mm/h); \bar{R} 为平均降雨强度(mm/h); \bar{E}_{cj} 为第 j 场降雨的林冠平均蒸发强度(mm); \bar{E} 为林冠层饱和状态下平均蒸发强度(mm/h); \bar{E}_c 为林冠层平均蒸发强度(mm/h); $S_c = S/c$, S 为林冠枝叶部分的持水能力(mm); S_t 为树干的持水能力(mm); P_t 为树干茎流系数; P_{Gj} 为第 j 场降雨的降雨量(mm)。

1.4 神经网络预测模型的构建与优化

1.4.1 神经网络模型的构建 BP 神经网络是一种前馈型神经网络。网络结构组成包括输入层、隐含层和输出层,通过其误差函数梯度下降,从而不断调整隐含层的连接权值和连接阈值以确定学习网络结构^[14]。

1.4.2 基于麻雀搜索算法的神经网络模型构建 本文采用麻雀搜索算法对 BP 神经网络模型进行优化,麻雀搜索算法来源于麻雀的觅食行为和反捕食行为的启发,分成发现者和追随者,并加入侦察预警机制,每个个体位置对应一个解,发现者主要为整个种群提供寻优方向和区域,追随者则是跟随发现者进行稳定的范围内变化,警戒者负责对于寻优区域的监视出现巨大变化时提示神经网络该训练结果无效。在麻雀搜索算法中,在寻优过程中,依据 SSA 算法更新规则,通过不断进行位置更新,寻找最佳适应度完成迭代优化^[18],并利用寻优过后得到的最优参数构建 SSA-BP 神经网络模型。

1.4.3 预测模型的建立和参数的确定 确定 SSA-BP 神经网络的结构,根据模拟结果的决定系数以确定隐含层节点数,确定 BP 神经网络的最佳隐含层节点数为 3,SSA-BP 神经网络的隐含层节点数为 7。当神经网络模型参数中的学习速率设置为 0.01,最小误差设置为 0.000 001,最大迭代次数为 50,训练方法采用 Sigmoid 双曲正切 S 形函数(tansig)为中间层神经元传递函数,采用线性函数(purelin)为输出层神经元传递函数,采用 Levenberg-Marquardt 算法(trainlm)作为网络的训练函数^[17],可有效提高网络的收敛

速度和模拟精度。

1.5 模型评价

采用绝对误差(MAE)、均方误差(MSE)、均方根误差(RMSE)、平均绝对百分比误差(MAPE)和决定系数(R^2)对模型进行评价。

$$MAE = \frac{1}{N} \sum |J_P - J_M|$$
 (7)

$$MSE = \frac{1}{N} \sum (J_M - J_P)^2$$
 (8)

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum (J_M - J_P)^2}$$
 (9)

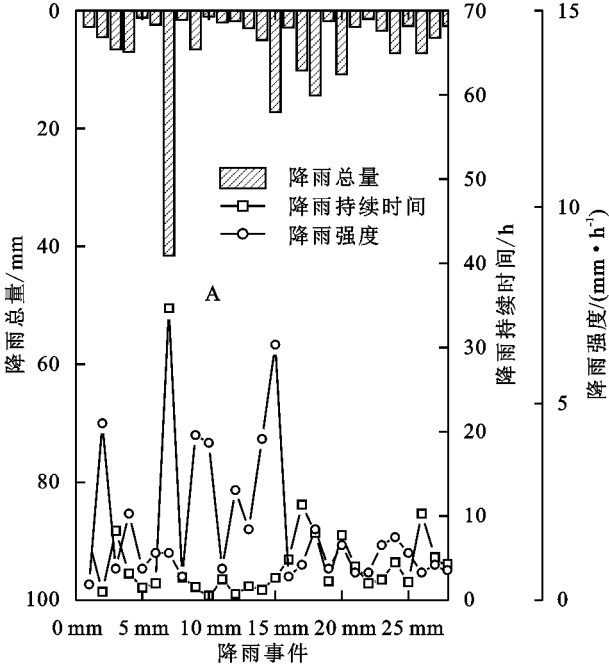
$$MAPE = \frac{1}{N} \sum \left| \frac{J_P - J_M}{J_M} \right|$$
 (10)

式中: N 为样本数; J_P 为预测值; J_M 为实测值。

1.6 因子重要度分析

利用输入层到隐含层的连接权值和隐含层到输出层的连接权值对模型的各输入变量对输出变量的重要程度进行计算,即因子重要度,它能直观地反映输入层各个因子的重要程度^[17],计算公式如下:

$$S_i = \frac{\sum_{j=1}^m W_{ii} - W_{jk}}{\sum_{i=1}^l \sum_{j=1}^m W_{ij} - W_{jk}}$$
 (11)



$$C_i = \frac{S_i}{\sum_{i=1}^l S_i} \times 100\%$$
 (12)

式中: S_i 和 C_i 分别为第 i 个输入对第 k 个输出的绝对贡献和相对贡献的大小; l,m 分别为输入层、隐含层的神经元个数; i,j,k 分别为输入层、隐含层和输出层神经元序号。

1.7 数据处理

用 SPSS 23 进行相关性分析和因子重要度分析,采用 MATLAB R2018b 进行神经网络模型的构建、训练和预测,利用 Origin 2021 软件绘图。

2 结果与分析

2.1 观测期间降雨事件和气象因子变化

观测期间累计发生降雨 28 场(图 1A),累计降雨量为 176.2 mm,以 0~10 mm 的降雨事件为主,占降雨事件的 82.2%,降雨量占累计降雨量的 46.5%;其次为 10~25 mm 区间,占降雨事件的 14.3%,降雨量占累计降雨量的 29.9%。降雨强度的变化范围 0.4~6.5 mm/h,平均降雨强度为 1.76 mm/h,≤5 mm/h 降雨次数占比达到 96.43%。

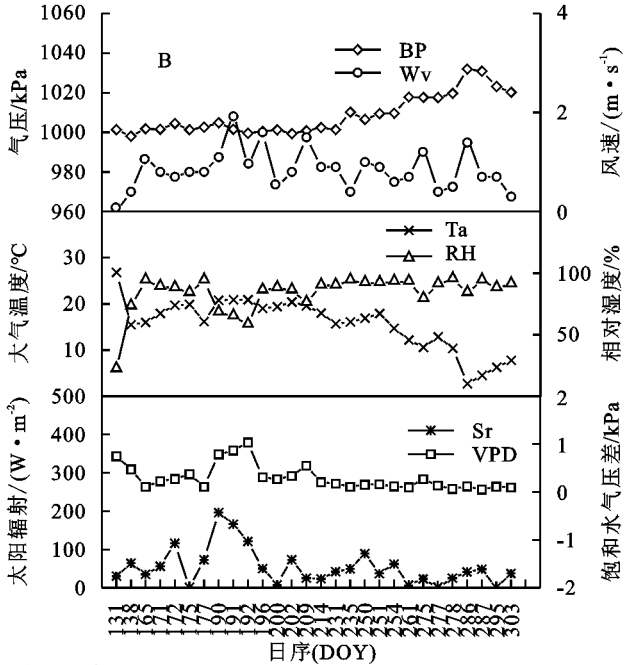


图 1 研究区观测期间降雨事件和气象因子变化

Fig. 1 Changes of rainfall events and meteorological factors during the observation period in the study area

2.2 穿透雨、树干茎流及林冠截留分配特征

观测期间刺槐的穿透雨量为 154.19 mm(图 2A),占总降雨量的 87.45%。当降雨量>1.37 mm 时产生穿透雨,穿透雨量与降雨量呈线性相关($R^2=0.99, p<0.01$),随着降雨量增加呈现增加趋势(图 2A),穿透雨率随着降雨量增加呈现先增加后趋于稳定的趋势(图 2B)。平均树干茎流量为 0.2 mm(图

2C),占降雨总量的 2.42%,当降雨量>2.17 mm 时产生树干茎流(图 2C),树干茎流量与降雨量呈线性正相关($R^2=0.94, p<0.01$)。树干茎流率随着降雨量的增加而增加,降雨量>5 mm,树干流显著增加(图 2D)。林冠累计截留量为 16.90 mm(图 2E),林冠层截留率均值占降雨总量 10.42%,林冠截留量随着林外降雨量的增加而逐渐增大(图 2F),林冠层截留量和降雨量

间呈极显著的线性关系($R^2=0.93, p<0.01$),林冠截留

率随着降雨量增加而减少(图 2F)。

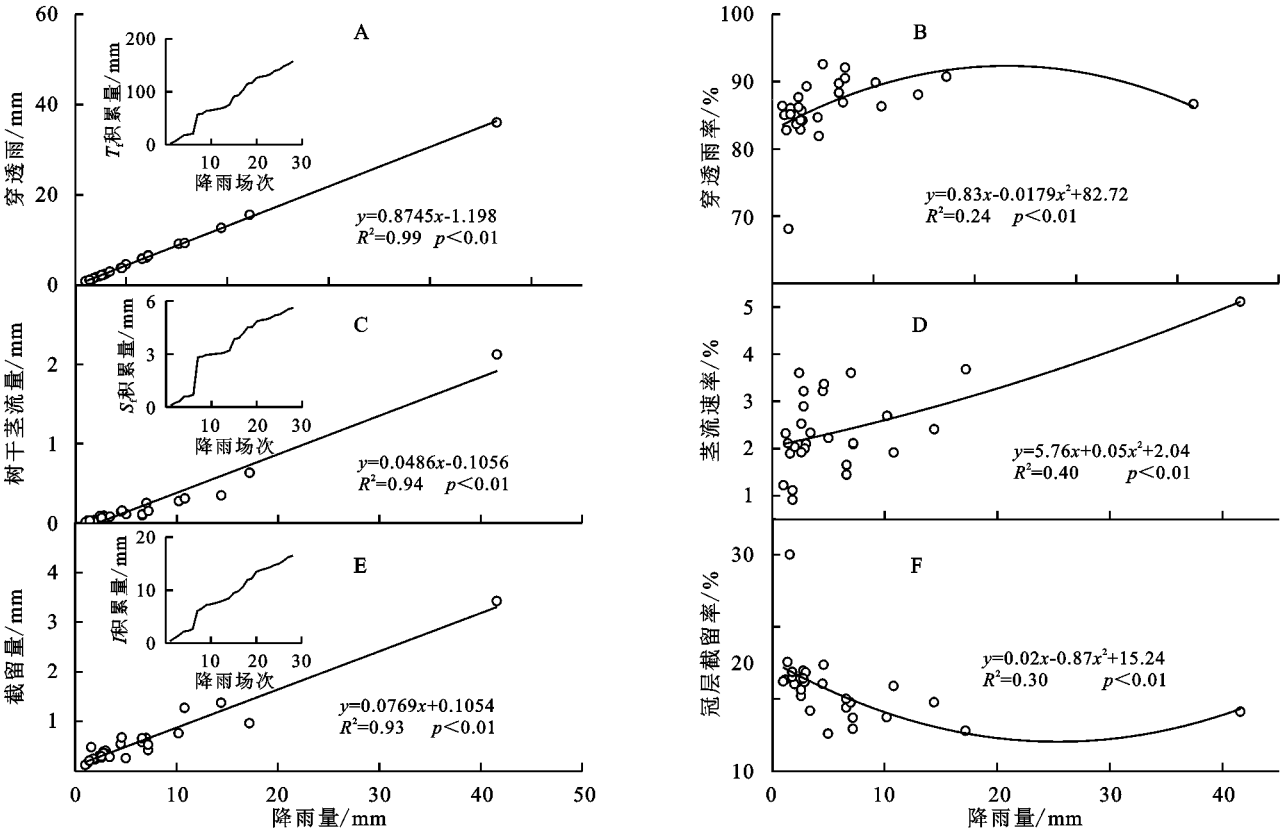


图 2 穿透雨量、树干茎流量、截留量与降雨量的关系

Fig. 2 Relationship between throughfall, stemflow, interception and rainfall

2.3 Gash 修正模型模拟林冠截留过程

根据观测期间的降雨强度计算得出刺槐的饱和林冠蒸发速率(\overline{E})为 0.13 mm/h;林冠持水能力(S)以 Leyton 回归法计算($y=0.95P-0.48$),得到林冠枝叶部分的持水能力(S)为 0.48 mm;降雨量与树干茎流回归方程为 $y=0.05x-0.11$,其截距为树干持水能力(S_t)(0.11 mm),斜率为树干茎流系数(P_t)(0.05)(图 2C);自由穿透系数(p)可通过最小降雨量与其穿透降雨量之反比来确定为 0.85;公式(5)得到林冠达到饱和状态的林外降雨量(P'_G)为 0.85 mm;

由公式(6)确定树干持水能力达到饱和状态所需的最小降雨(P''_G)为 4.89 mm;根据观测区降雨数据,对观测期间林冠截留进行模拟结果见表 2。

从表 2 可知,Gash 模型模拟刺槐林冠层截留量为 23.05 mm,其中模拟树冠截留结果中降雨结束前林冠蒸发阶段,占林冠总截留量的 43.03%;其次为降雨停止后的林冠蒸发阶段,占林冠总截留量的 29.02%;树干截留占林冠截留的 14.06%。此外,林冠达到饱和状态下林冠湿润过程,仅占林冠总截留量的 1.95%。

表 2 修正的 Gash 模型模拟结果与实测值对比

Table 2 Comparison of the modified Gash model simulation result with the measured values

林冠截留	表达式	模拟截留/mm	实测值/mm
林冠未达到饱和状态的 m 次降雨事件($P'_{Gj} < P'_G$)	$(1-p-P_t) \sum_{j=1}^m P_{Gj}$	2.75	
林冠达到饱和状态 n 次降雨事件下林冠湿润过程($P_G < P'_G$)	$ncP'_G - ncSc$	0.45	
降雨停止前林冠蒸发	$c \frac{\overline{E}_c}{R} \sum_{j=1}^n (P_{Gj} - P'_G)$	9.92	
降雨停止后的林冠蒸发	$ncSc$	6.69	
树干蒸发,其中 q 次降雨树干达到饱和其余($m+n-q$)次树干未饱和	$qS_t + P_t \sum_{j=1}^{m+n-q} P_{Gj}$	3.24	
总截留量	I	23.05	16.5

2.4 神经网络模型模拟林冠截留过程

2.4.1 模型输入参数的确定及因子重要度 通过引入输入层神经元变量(影响因子)与输出层神经元(林冠层截留量)的连接权值和连接阈值,计算自变量对因变量的重要度。结合相关性(表 3)选取因子重要度>10%环境因子模拟效果最优(图 3),确定模型研究区模型输入变量为降雨量、空气温度、相对湿度、饱和水汽压、降雨强度、降雨持续时间,因子重要度分别为 17.28%,13.51%,13.12%,12.81%,11.62%,11.52%。

2.4.2 林冠层截留量预测模型的训练与检验 为检验神经网络模型优化后的模拟情况,选取 2019 年 28 场降雨数据,按照 18 组训练集和 10 组测试集进行仿真分析,采用 BP 结合 SSA-BP 神经网络模型对林冠层截留量进行预测。由图 4A 可以看出,SSA-BP 模型相比于 BP 模型明显效果更优,优化后的模型精度有明显提高。由表 4 可以看出,SSA-BP 模型比 BP 模型和 Gash 修正模型的决定系数分别提高了 68%,1.2%,平均绝对误差

分别降低了 57.48%,40.39%,均方误差分别降低了 84.45%,61.48%,均方误差分别降低了 60.55%,37.93%,平均绝对百分比误差分别降低了 71.26%,50.25%,预测精确性精度方面的显著提升。优化后 SSA-BP 神经网络模型拟合精度可达到 84%(图 4B),在预测林冠层截留方面具有一定的可靠性。

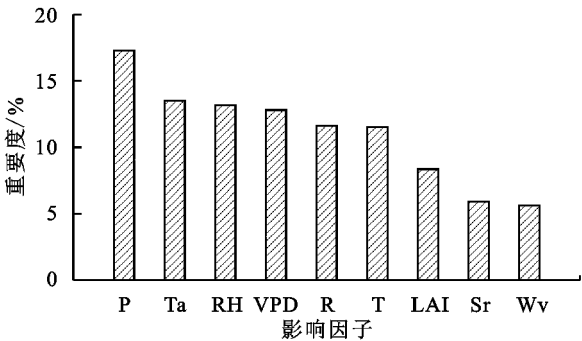


图 3 环境因子与林冠截留的重要度分析
Fig. 3 Importance analysis of environmental factors of canopy interception

表 3 林冠截留与环境因子的 Pearson 相关性分析

项目	P	R	T	Wv	Ta	RH	Sr	VPD	LAI	I
P	1	0.45	0.88***	0.44**	0.96	0.18	0.79	-0.32	0.40	0.97***
R		1	0.19	0.45**	0.16	-0.46	0.50	0.72	0.04**	0.86
T			1	0.27	0.63	0.30	0.95	-0.56	0.02	0.90***
Wv				1	0.98	0.34	0.34	-0.42	0.21	0.07*
Ta					1	-0.53	0.05	0.60	0.85	0.98
RH						1	-0.13	-0.97***	-0.28	0.26
Sr							1	0.23	0.48	0.50
VPD								1	0.20	0.42
LAI									1	0.40
I										1

注:***表示在 0.001 的显著性水平,**表示在 0.01 的显著性水平,*表示在 0.05 的显著性水平。I 为截留量;P 为降雨量;R 为降雨强度;T 为降雨历时;Ta 为空气温度;Sr 为太阳辐射;Wv 为风速;RH 为相对湿度;VPD 为饱和水汽压差;LAI 为叶面积指数。

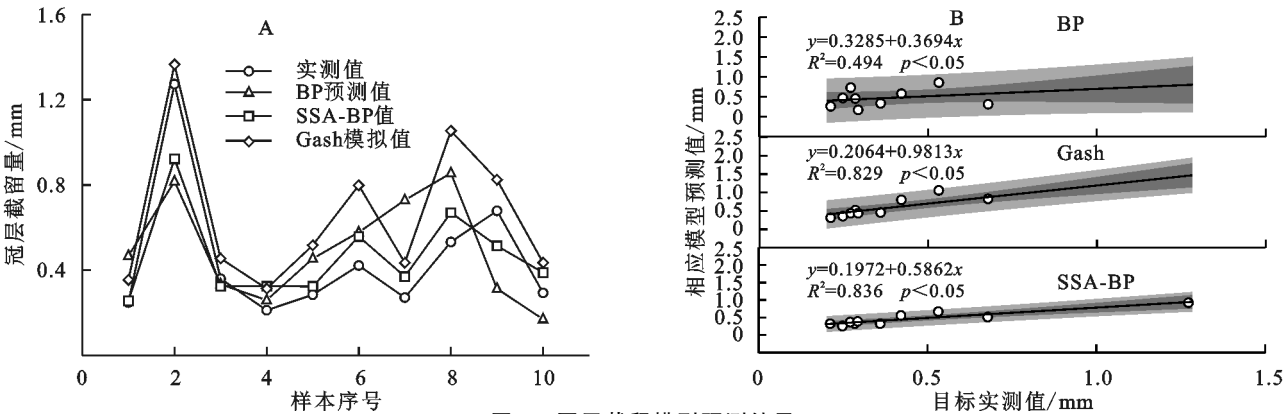


图 4 冠层截留模型预测结果
Fig. 4 Prediction results of canopy interception model

3 讨论

3.1 刺槐林冠层截留及其影响因素

降雨的再分配格局对区域生态水文功能的稳定

性维持具有重要的意义。干旱地区林木对于降雨再分配的响应,主要受到降水特征和林冠特征的综合调控^[20-21]。观测期间以 0~10 mm 的小降雨事件为主,刺槐林在降雨量级中林冠层截留率变化幅度为

10.62%~12.16%。在小雨事件中,林冠的截留能力受到 LAI、冠层厚度、郁闭度的影响,低于其他相关研究冠层截留率 16.5%~31.67%^[22-23]。董玲玲等^[23]对油松林冠层截留过程的研究发现,在小雨条件下,冠层截留能力较强,冠层厚度、枝叶粗糙度对于降雨的影响作用较大。张建国等^[24]研究发现,受到干旱胁迫影响的刺槐林由于出现枯梢现象,林冠层截留量会偏低。本研究发现宁夏河东沙区刺槐人工林存在

较高的穿透雨量(占累计降雨量的 87.45%),这与王艳萍等^[10]的研究结果较为一致。对于干旱区人工植被,植物根际土壤水分主要来源于树干茎流量和穿透雨量^[25]。雨水受到林冠层拦截和缓冲,使得土壤水分呈现空间异质性分布,进而对沙地水土保持功能产生影响。此外,相关研究也表明特殊天气、露水、雾气、冠层稀疏、叶片性状、树种组成等因素,都会对林冠层降雨再分配产生影响^[26]。

表 4 不同模型模拟结果对比

Table 4 Comparison of simulation results in different models

模型算法	拟合方程	R^2	MAE	MSE	RMSE	MAPE/%
BP	$y = 0.37x + 0.33$	0.50	0.277	0.143	0.378	90.24
SSA-BP	$y = 0.59x + 0.20$	0.84	0.118	0.022	0.148	25.94
Gash 修正模型	$y = 0.98x + 0.21$	0.83	0.198	0.058	0.241	52.43

3.2 Gash 修正模型模拟干旱区刺槐冠层截留的适用性

Gash 修正模型上需要对原有模型所涉及的林冠层蒸发强度、树干茎流产生阈值、有无植被覆盖、干燥间隔时间等指标进行补充修正^[27]。应用 Gash 修正模型得到的林冠层截留量模拟值与实测值存在不同的误差^[8-11],如:黄土区人工刺槐林截留量模拟高于实测值 3.2 mm^[10],祁连山青海云杉林截留量模拟低于实测值 14.7 mm^[12],侧柏纯林和侧柏黄栌混交林,截留量模拟低于实测值 16.41,37.7 mm^[8]。Gash 修正模型参数的测定精度对模拟的结果影响极大,降雨前后间隔时间过长,会使得模型参数林冠蒸发速率的误差变大,间隔过短林冠层不能完全干燥,影响模型模拟的精度^[11]。武秀荣等^[12]研究青海云杉发现林冠截留量对林冠平均蒸发速率最为敏感,Limousin 等^[28]研究常绿阔叶林认为林冠郁闭度对截留量影响最大,而王艳萍等^[10]研究刺槐人工林发现林冠持水能力对其影响最大。此外,在强降雨事件中,存在不稳定拦截的发生,雨滴飞溅现象会促进穿透雨和树干流量增加^[29],不同地区因林分结构、林木生长及环境因素差异导致 Gash 修正模型的模拟结果存在较大的差异性。

3.3 神经网络及其优化模型模拟刺槐冠层截留的适用性

本文尝试应用神经网络进行林冠层截留过程的模拟预测,并利用麻雀搜索算法自身强大的局部、全局搜索能力及快速收敛能力,对 BP 神经网络的初始权值和阈值进行优化^[14]。由于冠层截留过程受降雨特征、气象条件以及冠层结构等要素影响,模型输入参数较多且具有一定的随机性,造成输出结果的不确定性^[7]。因此,本研究先对各输入变量对输出变量的重要程度进行计算,将影响冠层截留的因素全面考

虑,并提取与林冠层截留相关性较大的影响因素作为模型输入参数,可以在一定程度上降低收敛速度,有效避免模型结果冗余的问题。神经网络在森林生态水文学的应用越来越受到重视,如李辉东^[16]、韩永贵^[17]等利用 BP 神经网络来模拟林冠蒸腾和季节响应,取得了较高的拟合精度。加入麻雀搜索算法后可以显著提高神经网络模拟结果,如贾悦等^[15]利用麻雀搜索算法优化后的神经网络模型研究京津冀地区参考作物蒸散量,其拟合精度可以达到 86.2%~94.0%。有学者在预测模拟河川径流量的研究中,发现 SSA-BP 神经网络模型的预测值最接近观察值,精度可以达到 90.0% 以上^[18],这些研究都证明了神经网络模型具有强大的泛化能力和学习能力,能够模拟具有复杂关系的响应过程。本研究采用 SSA-BP 神经网络模型模拟干旱地区刺槐人工林冠层截留,精度可达到 84%,与 Gash 修正模型相比,两者模拟精度均在 0.80 以上,但 SSA-BP 模型结果决定系数提高了 1.2%,绝对误差降低了 40.39%,表明 SSA-BP 神经网络模型具有较高的可靠性,可以弥补因输入参数精度低等问题产生的误差,从而提高了林木冠层截留过程模拟的稳定性与可靠性。

4 结论

观测期间刺槐人工林穿透雨量、树干茎流量、林冠截留量分别为 154.19,5.61,16.5 mm,分别占降雨量 87.45%,3.18%,9.36%,产生穿透雨和树干茎流的阈值分别为 1.37,2.17 mm。与 Gash 修正模型模拟林冠截留量相比,在 BP 神经网络模型中引入麻雀搜索算法,均方误差降低了 61.48%,平均绝对误差降低了 40.39%,均方根误差降低了 37.93%,平均绝对百分比误差降低了 50.52%,决定系数提高了 1.2%,可以有效降低模拟误差,提高模型的预测精度,能更好地模

拟林冠截留与影响因子之间的联系,具有较好的学习效率、稳定性和适用性。

参考文献(References):

- [1] Deng J F, Yao J Q, Zheng X, et al. Transpiration and canopy stomatal conductance dynamics of Mongolian pine plantations in semiarid deserts, Northern China[J]. *Agricultural Water Management*, 2021,249:106806.
- [2] Bonan G B. Forests and climate change: Forcings, feedbacks, and the climate benefits of forests[J]. *Science*, 2008,320(5882):1444-1449.
- [3] Yue K, De Frenne P, Fornara D A, et al. Global patterns and drivers of rainfall partitioning by trees and shrubs[J]. *Global Change Biology*, 2021,27(14):3350-3357.
- [4] Chen S J, Chen C G, Zou C B, et al. Application of Gash analytical model and parameterized Fan model to estimate canopy interception of a Chinese red pine forest [J]. *Journal of Forest Research*, 2013,18(4):335-344.
- [5] Wang D G, Wang G L, Anagnostou E N. Evaluation of canopy interception schemes in land surface models[J]. *Journal of Hydrology*, 2007,347(3/4):308-318.
- [6] Gash J. An analytical model of rainfall interception by forests[J]. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 1979,105(443):43-55.
- [7] 吕爱锋,王蕾,曲波.我国植被冠层降水截留研究进展[J].*南水北调与水利科技(中英文)*,2022,20(4):724-736.
Lu A. F, Wang L, Qu B. Research progress of vegetation canopy interception in China [J]. *South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology*, 2022,20(4):724-736.
- [8] 李亦然,马睿,张永涛,等.基于 Gash 修正模型模拟侧柏及其混交林的林冠截留过程[J].*生态学杂志*,2019,38(5):1331-1338.
Li Y R, Ma R, Zhang Y T, et al. Simulation of canopy rainfall interception of *Platycladus orientalis* forest and its mixed forest using the modified Gash model[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2019,38(5):1331-1338.
- [9] 陈妍,余坤勇,姚雄,等.南方水土流失区马尾松林降雨截留再分配特征与修正的 Gash 模型模拟[J].*西北林学院学报*,2022,37(4):50-56.
Chen Y, Yu K Y, Yao X, et al. Redistribution characteristics of rainfall interception and the modified Gash model based simulation of *Pinus massoniana* in southern soil erosion area[J]. *Journal of Northwest Forestry University*, 2022,37(4):50-56.
- [10] 王艳萍,王力,卫三平.Gash 模型在黄土区人工刺槐林冠降雨截留研究中的应用[J].*生态学报*,2012,32(17):5445-5453.
Wang Y P, Wang L, Wei S P. Modeling canopy rainfall interception of a replanted *Robinia pseudoacacia* forest in the Loess Plateau[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2012,32(17):5445-5453.
- [11] 曹光秀,赵洋毅,段旭,等.基于修正的 Gash 模型模拟中亚热带常绿阔叶林降雨截留过程[J].*水土保持学报*,2018,32(2):364-371.
Cao G X, Zhao Y Y, Duan X, et al. Simulation of canopy rainfall interception of the evergreen broad-leaved forest in mid subtropical zone using the modified Gash model[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2018,32(2):364-371.
- [12] 武秀荣,金铭,赵维俊,等.运用 Gash 修正模型对祁连山北麓中段青海云杉林降水截留的模拟[J].*水土保持学报*,2020,34(5):216-222.
Wu X R, Jin M, Zhao W J, et al. Application of modified Gash model to simulate rainfall interception of *Picea Crassifolia* forest in the middle of the northern slope of Qilian Mountain[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2020,34(5):216-222.
- [13] Deng J F, Li J H, Deng G, et al. Fractal scaling of particle-size distribution and associations with soil properties of Mongolian pine plantations in the Mu Us Desert, China[J]. *Scientific Reports*, 2017,7:6742.
- [14] Xue J K, Shen B. A novel swarm intelligence optimization approach: Sparrow search algorithm[J]. *Systems Science & Control Engineering*, 2020,8(1):22-34.
- [15] 贾悦,苏永军,张冉,等.气象资料受限条件下 BP 神经网络优化模型模拟参考作物蒸散量;以京津冀地区为例[J].*中国农业气象*,2022,43(1):1-16.
Jia Y, Su Y J, Zhang R, et al. Simulation of reference crop evapotranspiration by BP neural network optimization model with limited meteorological data: A case study in the Beijing-Tianjin-Hebei region[J]. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 2022,43(1):1-16.
- [16] 李辉东,关德新,袁凤辉,等.BP 人工神经网络模拟杨树林冠蒸腾[J].*生态学报*,2015,35(12):4137-4145.
Li H D, Guan D X, Yuan F H, et al. Modeling canopy transpiration of young poplar trees(*Populus × euramerica* cv. N3016) based on Back Propagation Artificial Neural Network[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2015,35(12):4137-4145.
- [17] 韩永贵,高阳,韩磊,等.基于模糊规则的人工神经网络模拟新疆杨蒸腾耗水[J].*应用生态学报*,2020,31(5):1525-1534.
Han Y G, Gao Y, Han L, et al. Modeling water consumption of *Populus bolleana* by artificial neural network based on fuzzy rules[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2020,31(5):1525-1534.
- [18] Yao Z Y, Wang Z C, Wang D W, et al. An ensemble CNN-LSTM and GRU adaptive weighting model based

- improved sparrow search algorithm for predicting runoff using historical meteorological and runoff data as input[J]. *Journal of Hydrology*, 2023,625:129977.
- [19] 柳利利,韩磊,高阳,等.宁夏河东沙区刺槐和丝绵木水分利用策略[J].*生态学报*,2023,43(2):812-825.
- Liu L L, Han L, Gao Y, et al. Water use strategies of *Robinia pseudoacacia* and *Euonymus bungeanus* in the east sandy land of the Yellow River in Ningxia, China [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2023,43(2):812-825.
- [20] Magliano P N, Whitworth-Hulse J I, Baldi G. Interception, throughfall and stemflow partition in drylands: Global synthesis and meta-analysis [J]. *Journal of Hydrology*, 2019,568:638-645.
- [21] Wang D, Wang L, Zhang R. Measurement and modeling of canopy interception losses by two differently aged apple orchards in a subhumid region of the Yellow River Basin [J]. *Agricultural Water Management*, 2022,269:107667.
- [22] 庞维华,孙雅婕,刘建军.不同类型园林植物群落冠层的截留能力研究[J].*水土保持通报*,2022,42(4):49-55.
- Pang W H, Sun Y J, Liu J J. Canopy interception ability of different types of garden plant communities[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2022,42(4):49-55.
- [23] 董玲玲,康峰峰,韩海荣,等.辽河源 3 种林分降雨再分配特征及其影响因素[J].*水土保持学报*,2018,32(4):145-150.
- Dong L L, Kang F F, Han H R, et al. Traits and influencing factors of rainfall redistribution in three types of forest in Liaoheyuan [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2018,32(4):145-150.
- [24] 张建国,闫美杰,杜盛.连续降雨条件下黄土丘陵区两典型林分降雨分配特征研究[J].*水土保持研究*,2016,23(5):158-163,168.
- Zhang J G, Yan M J, Du S. Characteristics of rainfall partitioning in two typical forests under continuous rainfall in the Loess Hilly Region [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2016,23(5):158-163,168.
- [25] 王甜甜,朱林,赵学琳,等.三种典型固沙灌木的降雨再分配特征[J].*干旱区资源与环境*,2021,35(8):100-107.
- Wang T T, Zhu L, Zhao X L, et al. Rainfall redistribution characteristics of three typical sand-fixing shrubs [J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2021,35(8):100-107.
- [26] Deng J F, Yu Y F, Shao J, et al. Rainfall interception using the revised Gash analytical model for *Pinus sylvestris* var. *mongolica* in a semi-humid region of NE China [J]. *Ecological Indicators*, 2022,143:109399.
- [27] Herbst M, Rosier P T W, McNeil D D, et al. Seasonal variability of interception evaporation from the canopy of a mixed deciduous forest [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2008,148(11):1655-1667.
- [28] Limousin J M, Rambal S, Ourcival J M, et al. Modelling rainfall interception in a Mediterranean *Quercus ilex* ecosystem: Lesson from a throughfall exclusion experiment [J]. *Journal of Hydrology*, 2008,357(1/2):57-66.
- [29] Zhang Y F, Wang X P, Hu R, et al. Rainfall partitioning into throughfall, stemflow and interception loss by two xerophytic shrubs within a rain-fed re-vegetated desert ecosystem, northwestern China [J]. *Journal of Hydrology*, 2015,527:1084-1095.

(上接第 187 页)

- [25] 闫海龙,张希明,许浩,等.塔里木沙漠公路防护林 3 种植物光合特性对干旱胁迫的响应[J].*生态学报*,2010,30(10):2519-2528.
- Yan H L, Zhang X M, Xu H, et al. Photosynthetic characteristics responses of three plants to drought stress in Tarim Desert Highway shelterbelt [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2010,30(10):2519-2528.
- [26] 马成忠,邓继峰,丁国栋,等.不同初植密度樟子松人工林对毛乌素沙地南缘土壤粒度特征的影响[J].*水土保持学报*,2017,31(1):230-235.
- Ma C Z, Deng J F, Ding G D, et al. Effects of different planting densities of Mongolian pine on the soil particle size characteristics in southern Mu Us desert [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2017,31(1):230-235.
- [27] 张莹花,康才周,刘世增,等.沙地云杉(*Picea mongolica*)农田防护林带不同配置模式的防风效果[J].*中国沙漠*,2017,37(5):859-866.
- Zhang Y H, Kang C Z, Liu S Z, et al. Windbreak effect of *Picea mongolica* farmland shelterbelt with different configuration [J]. *Journal of Desert Research*, 2017,37(5):859-866.
- [28] 杨越,杨依天,武智勇,等.冀北坝上地区农田防护林防风固沙效应研究[J].*西北林学院学报*,2020,35(4):167-172.
- Yang Y, Yang Y T, Wu Z Y, et al. Studies on wind break and sand fixation effects of farmland shelterbelt in Bashang area of northern Hebei [J]. *Journal of Northwest Forestry University*, 2020,35(4):167-172.