

DOI: 10.5846/stxb201806301441

田娜, 古君龙, 杨新国, 王磊, 杨东东, 苗翻, 孟明. 荒漠草原中间锦鸡儿冠层截留特征. 生态学报, 2019, 39(14): - .

Tian N, Gu J L, Yang X G, Wang L, Yang D D, Miao F, Meng M. Characteristics of canopy interception by *Caragana intermedia* in desert grasslands. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(14): - .

荒漠草原中间锦鸡儿冠层截留特征

田 娜, 古君龙, 杨新国*, 王 磊, 杨东东, 苗 翻, 孟 明

宁夏大学西北土地退化与生态恢复省部共建国家重点实验室培育基地/西北退化生态系统恢复与重建教育部重点实验室, 银川 750021

摘要:以荒漠草原人工中间锦鸡儿(*Caragana intermedia*)为研究对象,利用 2016—2017 年监测获取的 26 次降雨事件,对比分析了两组灌丛(自然组和人工组)的冠层截留特征。结果表明:(1)试验期间共观测到有效降雨 33 次,总降雨量为 251 mm,次平均降雨量和降雨强度分别为 7.6 mm 和 1.14 mm/h,以雨量<2 mm,雨强<1 mm/h 和降雨历时 2—5 h 的降雨出现次数最多;(2)自然组和人工组中间锦鸡儿平均截留量分别为 1.11 mm 和 0.72 mm,平均截留率分别为 24.81%和 15.95%,两组灌丛截留存在极显著差异($P<0.01$);(3)在雨量级>15 mm 时,自然组(4.57%, CV = 73.38%)和人工组(5.25%, CV = 51.96%)平均截留率变异性相差最大;(4)自然组和人工组截留量与降雨量,降雨历时和降雨强度之间的关系可以用幂函数描述,截留率与三者的关系均用指数函数描述较好。在降雨特征相同的情况下,灌丛形态特征是影响中间锦鸡儿冠层截留的关键因素。

关键词:荒漠草原;中间锦鸡儿;衰退;冠层截留

Characteristics of canopy interception by *Caragana intermedia* in desert grasslands

TIAN Na, GU Junlong, YANG Xinguo*, WANG Lei, YANG Dongdong, MIAO Fan, MENG Ming

Breeding Base for State Key Laboratory of Land Degradation and Ecological Restoration in Northwest China/Ministry of Education Key Laboratory for Ecosystem in Northwest China, Ningxia University, Yinchuan 750021, China

Abstract: Canopy interception, an important component of water balance in arid and semiarid environments, plays a key role in re-vegetation and the hydrological cycle. Research regarding canopy rainfall interception across the sand-stabilizing shrub, *Caragana intermedia*, can aid in the elucidation of the eco-hydrological mechanism in desert grasslands. In this study, planted *C. intermedia* in a desert grassland was selected, and characteristics of canopy interception in two groups of shrubs (natural and planted) were compared and analyzed by monitoring 26 rainfall events from 2016 to 2017. The results showed that a total of 33 effective rainfall events were observed during the experiment, and the total and average amounts, and intensity of rainfall were 251 mm, 7.6 mm, and 1.14 mm/h, respectively. Overall, rainfall events of less than 2 mm and 1 mm/h, as well as a 2—5 h duration had the highest frequency. The average interception of *C. intermedia* in the natural and planted groups were 1.11 mm and 0.72 mm, respectively, and the average interception percentages were 24.81% and 15.95%, respectively. Significant differences ($P<0.01$) in interception were detected between the two groups. When the rainfall amount was greater than 15 mm, the natural group (4.57%, CV = 73.38%) and the planted group (5.25%, CV = 51.96%) exhibited the greatest differences in average interception percentages. Small amounts of rainfall contributed to a higher percentage of interception. Furthermore, the interception amount of the natural and planted group exhibited a power function that tended to decrease with increasing rainfall amount, duration, and intensity, whereas the interception percentage for the two groups had an obvious exponential function in the relationship with the rainfall amount,

基金项目:国家自然科学基金(31460161),宁夏大学西部一流学科建设项目(NXYLXK2017B06),宁夏大学西部一流大学建设项目(GZX2017001)

收稿日期:2018-06-30; **修订日期:**2019-05-28

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: xinguoyang1976@163.com

duration, and intensity. The canopy interception of planted *C. intermedia* was significantly reduced, which was conducive to the improvement of the efficiency of precipitation utilization and is of great significance in the elucidation of the hydrological mechanism of decline of canopy interception by planted vegetation. Morphological characteristics of shrubs were the key factors affecting the canopy interception of *C. intermedia* under the same rainfall conditions. Based on the morphological structures of different shrubs, the canopy structure (height, crown projection area, leaf area) affected canopy interception progress of shrubs.

Key Words: desert grassland; *Caragana intermedia*; decline; canopy interception

冠层截留作为水文循环过程中的重要环节,对土壤水分分布、地表径流产生、河川径流调节等影响重大^[1-3]。在干旱半干旱区,降雨是植被恢复与重建的关键限制因素,其对土壤水分的有效补给决定了植被恢复的可持续性^[4-6]。而冠层截留会影响到达地面的土壤水分含量,从而影响植物生长^[7]。研究灌丛冠层截留特征,对于理解荒漠草原区灌木的生态水文机理具有重要的意义,因此对灌丛冠层截留的研究一直是生态水文研究领域的热点问题^[8-9]。

冠层截留常受降雨特征、植被特征以及气象因素等多种因素的综合影响。降雨特征主要包括降雨量、降雨强度、持续时间、降雨间隔等^[10-11];植被特征主要包括冠层结构、高度、分枝角度、叶面积等^[12-15];气象因素主要包括风速、温度、湿度等^[16-17]。基于冠层截留的复杂性,国内外学者都对其进行了大量的研究。目前,关于植被冠层截留特征的研究多集中在温带森林^[18-19]和热带雨林^[20-22],而针对干旱半干旱区降雨截留的研究较少。Llorens 和 Domingo^[23]对过去 30 年来欧洲地中海地区降雨截留的试验研究进行了详尽的回顾,共包括 83 个地点的 29 种不同物种,而灌丛仅占 11%。近些年,国内学者关于干旱半干旱区灌木冠层截留的研究也逐渐丰富^[24-27],但针对衰退人工灌丛的研究较为少见。

中间锦鸡儿(*Caragana intermedia*)为豆科锦鸡儿属旱生灌木,耐贫瘠,抗干旱,是荒漠草原地带的优良固沙植物和荒山绿化植物^[28-29]。但是随着林龄和覆盖度的逐年增加,诸如土壤旱化与灌丛退化等问题开始涌现^[30-32]。地下水埋藏太深与降雨制约是干旱半干旱区灌丛衰退的主要原因^[33],然而关于荒漠草原衰退人工灌丛中间锦鸡儿(*C. intermedia*)冠层截留研究较少。中间锦鸡儿对降雨的截留作用如何?截留量与截留率有何变化?不同雨量级下截留对降雨量的响应规律如何?截留随降雨特征如何变化?以上问题是理解中间锦鸡儿对降雨有效利用的关键所在,是研究中间锦鸡儿衰退的水文机理的基础。

据此,本研究选取荒漠草原带状人工中间锦鸡儿林的典型灌丛为研究对象(人工组),以临近的自然散生中间锦鸡儿灌丛为对照(自然组),研究不同降雨事件下中间锦鸡儿冠层截留与降雨特征值的关系,分析截留量与截留率的变化、不同雨量级下截留对降雨量的响应、截留变化特征等内容,以此阐明人工中间锦鸡儿的冠层截留特征。

1 研究区概况

试验区位于宁夏盐池县皖记沟行政村(37°50'N,107°30'E),位于毛乌素沙地南缘,属鄂尔多斯台地向黄土高原过渡地区,海拔 1400 m。该区属中温带大陆性气候,冬冷夏热,年温差大,四季分明,年降雨量较少。多年平均降水量为 290.3 mm,降水主要集中在 7—9 月,降水年变率较大,年蒸发量 2136 mm。地貌形态以鄂尔多斯缓坡高原为主,主要地带性土壤为灰钙土,非地带性土壤以风沙土、黑垆土等为主。

研究区植被类型包括灌丛、草原、草甸、沙生植被和荒漠植被等,以灌丛、草原和沙生植被广泛分布为主^[34],其中灌丛主要为自然或人工中间锦鸡儿。人工林配置方式为两行一带,带距 6—8 m,株行距均为 1 m。在人工林边缘多见自然散生中间锦鸡儿的出现。

2 研究方法

试验于 2016 年 8—10 月和 2017 年 7—8 月进行。通过穿透雨和树干径流的测量,基于水量平衡公式,换

算截留量。

2.1 试验灌丛的选取和试验装置的布设

研究区存在两类中间锦鸡儿林,一类是人工种植的带状行生林,另一类是自然散生林,二者灌丛形态存在明显差别。灌丛相对矮小的人工中间锦鸡儿集中出现在行生林(人工组),而外貌形态发育正常,植丛生长较健壮的中间锦鸡儿多出现在散生林(自然组)。据此,分别随机选择散生林和行生林片区的 6 丛具有形态代表性的中间锦鸡儿作为自然组和人工组的试验样本。不同灌丛形态结构基本信息见表 1。

表 1 不同灌丛形态结构基本信息
Table 1 Basic information of morphological structures for different shrubs

	茎 Stem				冠层 Canopy		
	分枝数 Number	基径 Diameter/cm	枝长 Length/cm	角度 Angle/(°) °	高度 Height/cm	面积 Area/m ²	叶面积 Leaf area/m ²
自然组 Natural Group	20.00 ±2.63	1.23 ±0.15	100.05 ±10.46	59.28 ±3.07	125.00 ±13.05	0.13 ±0.03	0.41 ±0.11
人工组 Planted Group	39.00 ±3.39	0.79 ±0.07	69.79 ±0.83	51.48 ±1.15	103.00 ±2.26	0.08 ±0.01	0.18 ±0.03

穿透雨收集装置:自然组和人工组中间锦鸡儿穿透雨量均采用直径为 13 cm、外缘高 2 cm 的聚乙烯漏斗和外缘高 2 cm 的聚乙烯瓶收集。将聚乙烯漏斗按照 0°、90°、180°、270°辐射方向(即正北、正东、正南、正西 4 个方向)放置在以灌木基部为圆心的半径上。因人工组和自然组中间锦鸡儿冠幅大小不同,二者收集装置数量存在差异。自然组中间锦鸡儿每个方向上由内到外放置 3 个漏斗,距灌丛中心的距离分别为 40 cm、80 cm 和 120 cm,人工组中间锦鸡儿每个方向上由内到外放置 2 个漏斗,距灌丛中心的距离分别为 40 cm 和 80 cm。自然组和人工组中间锦鸡儿最外层穿透雨收集装置均为大气降雨收集装置。

树干径流收集装置:本实验采用自制的导流水槽装置测定灌丛树干径流(装置高约 5 cm)。用细砂纸打磨距离地面约 8 cm 处的树干基部,使得树干表面变得光滑,并用铝箔胶带将其完全环绕,确保树干与胶带间密封无缝隙。将类似“烟斗”的环形导流水槽与直径约 1 cm 的软吸管一端连接用于导水,另一端伸入聚乙烯瓶用于盛装径流。

2.2 大气降雨的测量

降雨量由安置在研究区内的自动气象站采集装置实时监测,降雨事件记录时间间隔为 1 小时。以次降雨为测量基准,即从降雨开始到降雨结束为一次降雨事件。若雨歇时间不足 4 小时,仍将其视为一次降雨。

2.3 穿透雨和树干径流的测量

穿透雨和树干径流的测量仪器均采用实验用标准量筒(规格:1000 mL,最小分度值 5 mL;规格:10 mL,最小分度值 0.1 mL)。每次降雨后,分别量取各自收集装置收集的穿透雨和树干径流体积即可。

2.4 穿透雨量、树干径流量和冠层截留量的计算

(1) 穿透雨量计算方法:用所测穿透雨量除以容器接受降雨的面积,将每株灌丛下承接的雨量加权平均,即为该次降雨下灌丛冠层的穿透雨量^[35]。

(2) 树干径流量计算方法:用树干径流量体积除以灌木投影面积,即可求得树干径流量^[36]。

$$SF = \sum_{i=1}^n \frac{C_i \times M_i}{As \times 1000}$$

(1)

式中, SF 为树干径流量(mm); n 为枝干个数; C_i 为每枝条平均树干径流体积(mL); M_i 为单株枝干数; As 为植株的投影面积。

(3) 冠层截留量计算方法:根据水量平衡原理,灌丛对降雨的再分配分为穿透雨,树干径流和冠层截留三部分,因此冠层截留量可通过水量平衡方程计算:

$$I = P - TF - SF$$

(2)

式中, I 为冠层截留量(mm), P 为降雨量(mm), TF 为穿透雨量(mm), SF 为树干径流量(mm)。

2.5 数据处理

运用 Microsoft Excel 2010 进行数据整理与分析。采用 t-检验方法,分析了自然组和人工组的截留差异显著性(显著性水平设定为 $\alpha=0.05$)。采用描述性统计的方法,分析了截留量对不同雨量级(<2 mm, 2—5 mm, 5—10 mm, 10—15 mm, >15 mm)降雨的响应规律。此外,采用回归方程和曲线拟合方法,分析截留变化特征,上述分析在 SPSS 20.0 统计软件中进行。

3 结果与分析

3.1 试验期间的降雨统计分布特征

整个观测期共计有效降雨 33 次,总降雨量为 251 mm。次降雨量最小值 0.2 mm,最大值 40.2 mm,平均降雨量为 7.6 mm。<2 mm、2—5 mm、5—10 mm、10—15 mm、15—20 mm、20—35 mm、>35 mm 7 个雨量级的降雨频率分别为 36.4%、21.2%、12.1%、18.2%、3.0%、6.1%、3.0%;累积降雨量分别为 8.6、22.4、31.6、74.2、16.4、57.6、40.2 mm,依次占总降雨量的 3.4%、8.9%、12.6%、29.6%、6.5%、22.9%、16.0%。从上述结果可知,雨量级为 10—15 mm 的降雨频数只有 18.2%,但其降雨量占总降雨量的 29.6%,对总降雨量影响最大(图 1)。降雨强度变化范围为 0.2—3.7 mm/h,其中降雨强度<1 mm/h 的降雨次数最多,占总降雨次数的 60.6%;降雨强度为

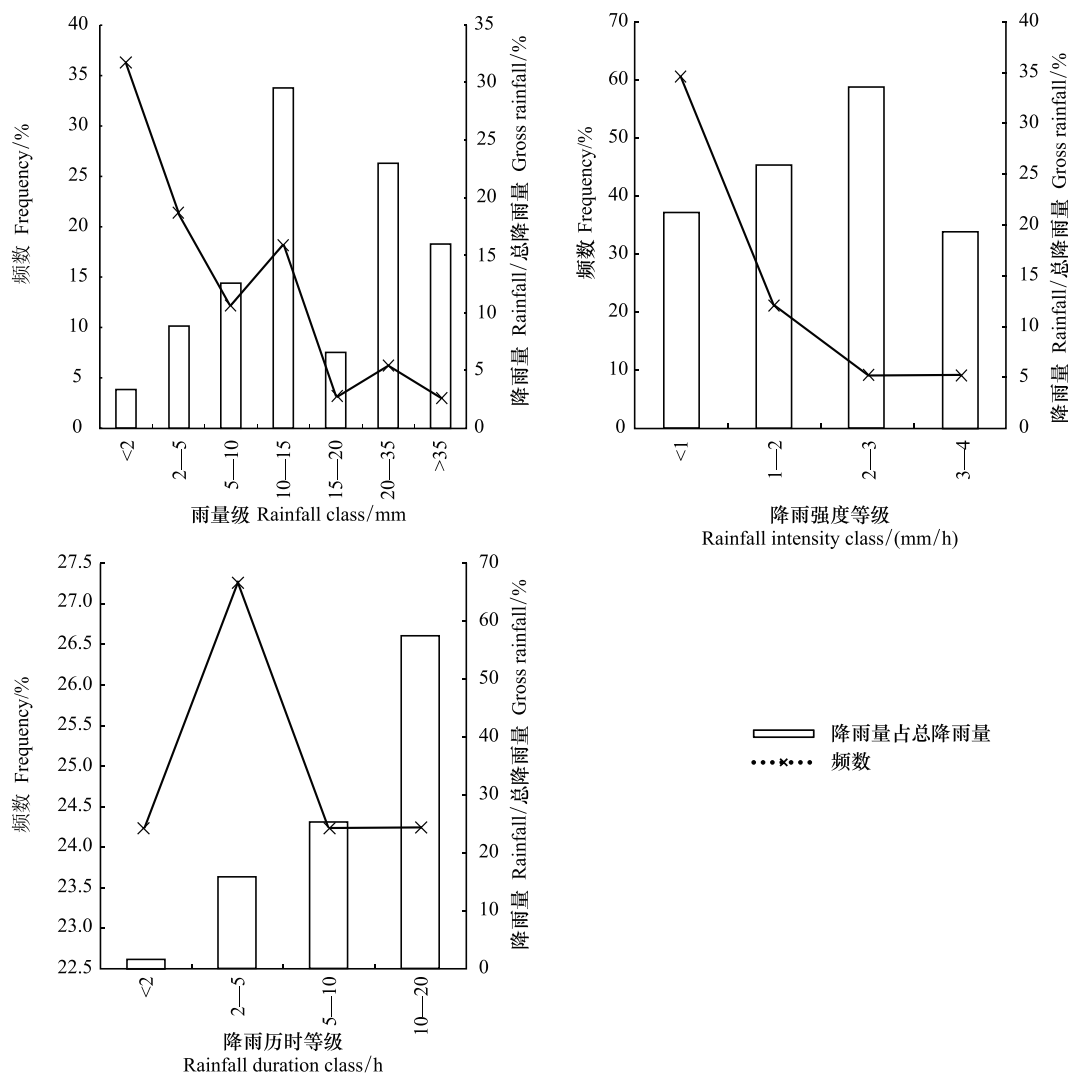


图 1 试验期间降雨分布特征

Fig.1 Characteristics of rainfall distribution during the experiment

2—3 mm/h 和 3—4 mm/h 的累计降雨次数分别为 1 和 2 次(图 1)。总降雨历时为 180 h,平均值为 5.5 h。历时等级为 2—5 h 的降雨次数最多,占总降雨次数的 27.4%(图 1)。总体来看,整个观测期间以雨量<2 mm,雨强<1 mm/h 和历时 2—5 h 的降雨出现次数最多。

3.2 截留量与截留率的统计分布特征

试验期间共观测到有效降雨 33 次,收集到穿透雨和树干径流 26 次。26 次降雨事件中自然组和人工组中间锦鸡儿累计截留量分别为 28.81 mm 和 18.83 mm。自然组截留量最大值为 3.27 mm,占次降雨量的 3.0%,最小值为 0.12 mm,占次降雨量的 1.0%;人工组截留量最大值为 3.28 mm,占次降雨量的 4.4%,最小值为 0.05 mm,占次降雨量的 0.2%。自然组平均截留量和截留率分别为 1.11 mm 和 24.81%,人工组平均截留量和截留率分别为 0.72 mm 和 15.95%。差异显著性分析结果表明:自然组和人工组中间锦鸡儿之间冠层截留存在极显著差异($P<0.01$)(图 2)。总体上,人工中间锦鸡儿冠层截留减少,这可能是形态特征发生改变的结果。

3.3 截留对降雨量的响应

在自然组中,平均截留量最大值和最小值分别为 1.61 mm 和 0.36 mm,分别出现在 2—5 mm 和<2 mm 雨量级中,平均截留率最大值和最小值分别为 46.45%和 4.57%,分别出现在 2—5 mm 和>15 mm 雨量级中。在人工组中,平均截留量最大值和最小值分别为 1.58 mm 和 0.24 mm,分别出现在>15 mm 和<2 mm 雨量级中,平均截留率最大值和最小值分别为 32.73%和 2.80%,分别出现在 2—5 mm 和 10—15 mm 雨量级中。两组灌丛(自然组和人工组)冠层截留量在小降雨事件下($PG<5$ mm)均占有很大的比例,这与 Brauman 等关于夏威夷地区小降雨事件增加会增大冠层截留的结论相一致^[37]。在雨量级较大($PG>10$ mm)时,两组灌丛(自然组和人工组)均有平均截留率最小值出现,并且各雨量级下自然组平均截留率均大于人工组(表 2)。

当降雨量在 5—10 mm 时,人工组(10.53%, CV = 76.26%)平均截留率的变异性最大。当降雨量在>15 mm 时,自然组(4.57%, CV = 73.38%)和人工组(5.25%, CV = 51.96%)平均截留率变异性相差最大。

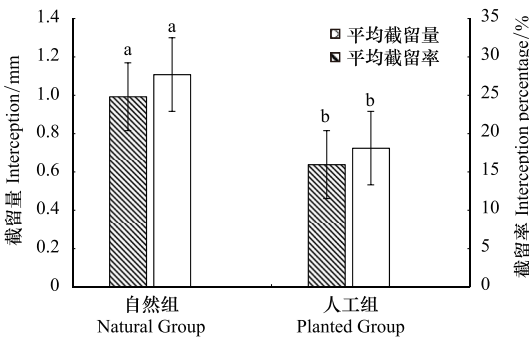


图 2 自然组和人工组中间锦鸡儿冠层截留差异显著性
Fig. 2 Significant differences in canopy interception of *C. intermedia* between natural and planted groups
不同小写字母表示自然组和人工组中间锦鸡儿平均截留量和截留率分别存在显著差异($P<0.05$)

表 2 试验期间自然组与人工组中间锦鸡儿冠层截留与降雨特征值的统计分布

Table 2 Statistical distribution of canopy interception and rainfall characteristic values for *C. intermedia* in natural and planted groups during the experiment

雨量级 Rainfall class/mm	降雨次数 Rainfall times	降雨量 Rainfall/mm		冠层截留 Canopy interception							
		均值 Average value/mm	CV/%	自然组 Natural Group				人工组 Planted Group			
				截留量 Interception/ mm	CV/%	截留率 Interception percentage/%	CV/%	截留量 Interception/ mm	CV/%	截留率 Interception percentage/%	CV/%
<2	6	1.13	46.91	0.36	60.07	35.46	44.96	0.24	57.49	22.22	34.77
2—5	6	3.33	24.79	1.61	73.26	46.45	57.73	1.12	95.50	32.73	72.73
5—10	5	8.28	18.44	1.18	65.95	15.72	73.17	0.78	61.86	10.53	76.26
10—15	6	12.37	14.41	1.18	79.98	10.22	87.30	0.33	65.19	2.80	75.24
>15	3	32.60	24.29	1.33	47.77	4.57	73.38	1.58	42.92	5.25	51.96

表中各雨量级下的截留量和截留率数据均为平均值;CV:变异系数 Coefficient of variation

3.4 截留变化特征

通过回归分析与曲线拟合,两组灌丛的截留量、截留率随降雨量的变化见图 3。幂函数($P<0.05$)和指数

函数 ($P < 0.01$) 可以分别描述自然组和人工组中间锦鸡儿的截留量和截留率随降雨量的变化过程。当降雨量较小 (< 10 mm) 时, 截留量均随降雨量的增加而迅速增加; 而超过一定雨量范围时, 变化缓慢并趋向稳定。在降雨量 < 10 mm 时, 两组灌丛 (自然组和人工组) 冠层截留率波动幅度均较大, 二者变化范围分别为 10%—40% 和 10%—25%。由此可见, 随着降雨量的不断增大, 灌丛枝条和叶片水分逐步达到饱和, 冠层对降雨的截留能力开始下降, 截留率逐渐减小并趋于稳定。由方程可得, 自然组截留率大于人工组, 这是因为生长良好的自然中间锦鸡儿叶面积和冠幅大于人工中间锦鸡儿, 其冠层对降雨的截留能力更强。

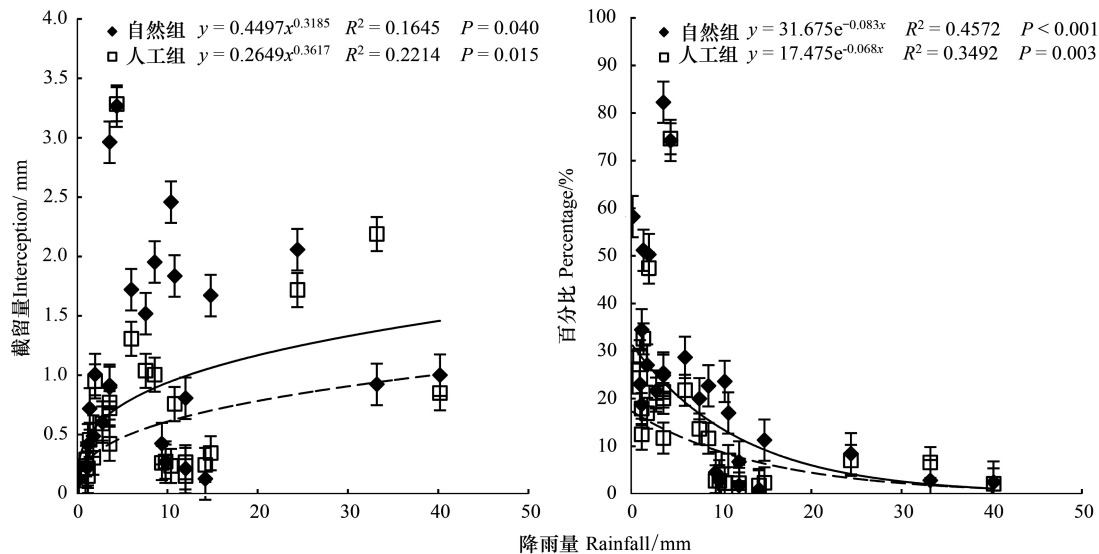


图3 截留量、截留率与降雨量的关系

Fig.3 Interception and interception percentage in relation to rainfall

NG: 自然组 Natural group; PG: 人工组 Planted group

回归分析与曲线拟合结果表明, 自然组和人工组中间锦鸡儿的截留量与降雨历时之间呈幂函数分布 ($P < 0.05$), 截留率与降雨历时呈指数函数分布 ($P < 0.01$) (图 4)。两组灌丛截留量随降雨历时均呈先增加后变化缓慢的趋势; 当降雨历时较短 (< 5 h) 时, 冠层截留率在均值附近波动较大, 随着降雨历时的增加 (> 10 h), 两组灌丛 (自然组和人工组) 的截留率逐渐趋于稳定的范围, 分别在 0—10% 和 0—5% 之间。

截留量与降雨强度关系的分析结果表明 (图 5), 幂函数可以描述自然组 ($P = 0.079$) 和人工组中间锦鸡儿 ($P < 0.05$) 的截留量随降雨强度的变化过程。对截留率与降雨强度之间的关系进行了线性、指数、幂函数的曲线拟合, 比较分析得出指数函数能更好地反映两组灌丛截留率与降雨强度的关系 ($P < 0.01$)。当降雨强度由 0 增加至 1 mm/h 时, 两组灌丛的截留率均呈递减趋势; 降雨强度 > 1 mm/h 时, 自然组和人工组截留率基本稳定在 0—30% 和 0—15%。截留率与降雨强度的变化间接反映了降雨过程中冠层水分蒸发影响下的截留模式, 这种截留模式对于认识干旱半干旱区水文循环过程具有重要作用。

4 讨论

旱生灌木冠层截留是干旱半干旱区水文循环过程中的一个重要环节, 对荒漠区人工植被的可持续管理具有实际意义。本研究中, 两组灌丛 (自然组和人工组) 平均截留率分别为 24.81% 和 15.95%, 与徐先英等^[38]在民勤绿洲边缘的梭梭 (*Haloxylon ammodendron*), 怪柳 (*Tamarix ramosissima*) 和生长良好白刺 (*Nitraria tangutorum*) 灌丛 (16.6%, 33.1% 和 12.0%), 杨志鹏等^[39]关于毛乌素沙地沙柳 (*Salix psammophila*) 灌丛 (24.9%) 的研究结果在接近的区间内; 而小降雨事件的出现频率和占比存在一定的差异, 本试验期间小降雨事件 ($PG < 5$ mm) 出现频率为 57.6%, 雨量占总降雨量的 42.4%; 对民勤绿洲的研究中雨量 < 5 mm 的降雨频率为 69.4%, 雨量占总降雨量的 43.1%^[38]; 对毛乌素沙漠的研究中降雨量 < 6 mm 的降雨频率为 63.0%, 雨量占总降雨

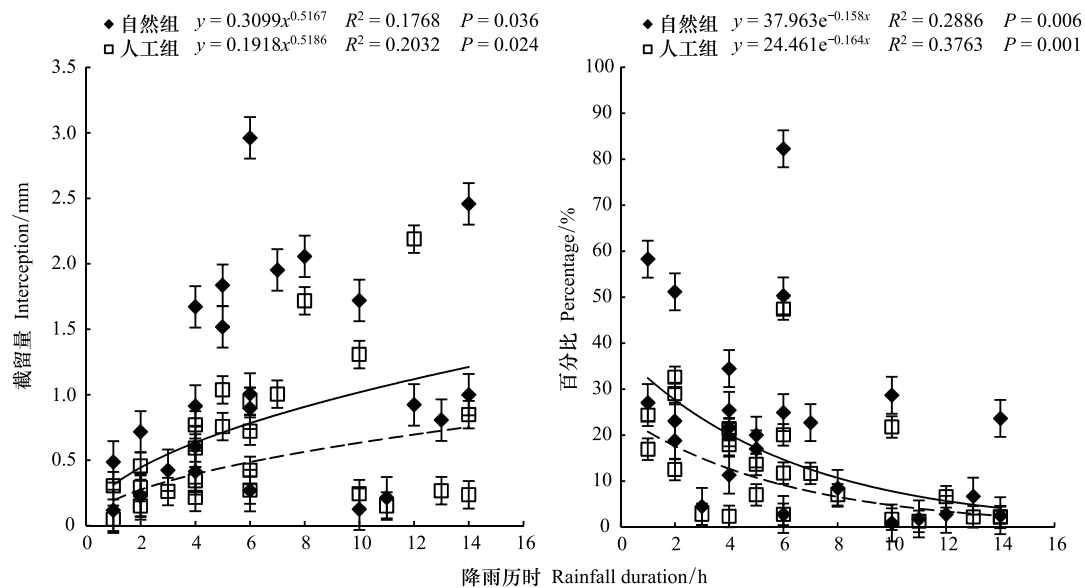


图4 截留量、截留率与降雨历时的关系

Fig.4 Interception and interception percentage in relation to rainfall duration

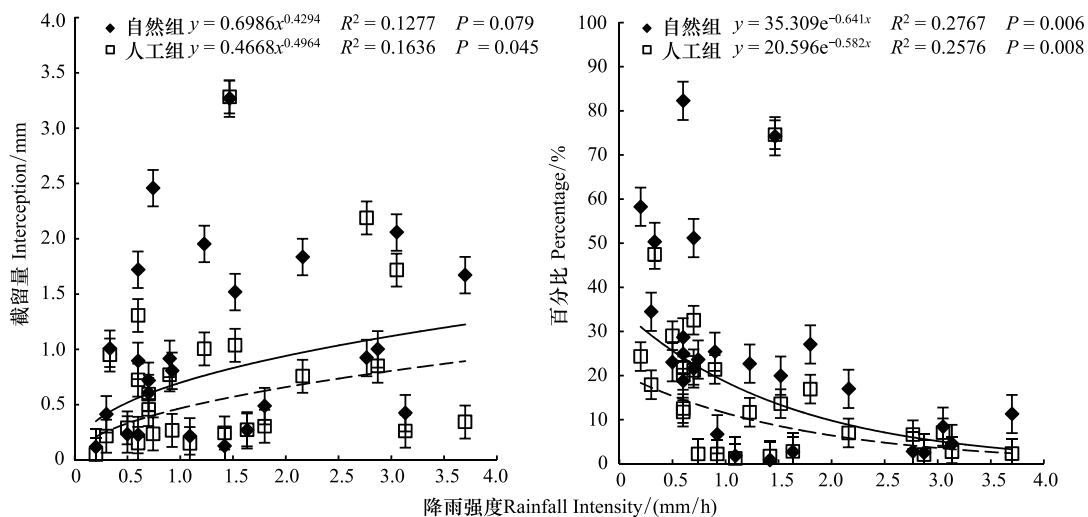


图5 截留量、截留率与降雨强度的关系

Fig.5 Interception and interception percentage in relation to rainfall intensity

量的 26.0%^[39],但均表明小降雨事件对截留率影响较大^[40];同时,不同物种冠层结构差异也会对截留产生较大影响^[41]。与半干旱区其他物种相比,中间锦鸡儿截留量和截留率明显低于樟子松^[42]和落叶松^[43]的研究结果。樟子松和落叶松属于高大乔木,树冠庞大、树皮鳞状纵裂、叶针型,冠层截留雨水量较多,且雨水沿着树干向下传输的距离较远、阻力较大,因此降雨消耗损失量较大;而中间锦鸡儿属低矮灌木,冠幅较小,冠层截留雨水能力较弱,且树皮和叶片光滑,降雨在林冠内停滞时间较短,雨水消耗少。在降雨特征相同的情况下,本研究中两组灌丛(自然组和人工组)的平均截留量和截留率存在显著差异,说明灌丛形态特征也是冠层截留的关键影响因素。

两组灌丛(自然组和人工组)的截留量与降雨量之间均呈幂函数关系,这与李晶晶等^[44]、陈书军等^[45]、方书敏等^[46]的研究结果一致。而指数函数能够较好地描述两组灌丛截留率与降雨量的变化关系。当雨量级较低($PG < 10$ mm)时,植物枝条和叶片对雨水有较强的吸附和蒸发作用,冠层截留量会随降雨量的增加快速增

加,当超过一定雨量范围时,叶片充分湿润,形成不利于雨滴附着的光滑面,截留量逐渐趋于稳定^[47];而截留率会随降雨量的增加逐渐降低,直至接近稳定。对比分析可知,自然组和人工组中间锦鸡儿接近稳定截留率的范围分别为 10%—40% 和 5%—20%,与灌丛的形态特征(如冠幅面积、叶面积大小等)有关,这与刘章文等^[48]的研究结果一致。

降雨强度也会对灌丛截留率产生影响。科尔沁沙地典型沙生灌木—黄柳(*Salix gordejvii*)截留率与降雨强度呈对数函数关系,雨强由 1 mm/h 增加至 8 mm/h 时,截留率由 25.93% 下降到 5.36%^[49];沙坡头地区固沙灌木柠条(*C. korshinskii*)和半灌木油蒿(*A. ordosica*)冠层截留率均为降雨强度的幂函数,降雨强度>1 mm/h 时,柠条和油蒿截留率基本稳定在 20%—30% 和 30%—40%^[50]之间。本研究中冠层截留率与降雨强度呈指数函数关系,与上述灌木、半灌木冠层截留率均随雨强的增加而下降的变化趋势相一致。这是因为与热带雨林或湿润地区相比,干旱半干旱区能量充足,冠层截留量主要由降雨过程和间歇期植被冠层和土壤的蒸发量组成^[49-50]。而截留率逐渐减小的原因是随着降雨强度的逐渐增大,降雨间歇期灌丛枝叶截留的雨水蒸发消耗量所占比例逐渐减小,从而导致截留率降低。

5 结论

自然组和人工组中间锦鸡儿平均截留量分别为 1.08 mm 和 0.62 mm,平均截留率分别为 27.45% 和 17.35%,两组灌丛冠层截留存在极显著差异($P<0.01$)。两组灌丛(自然组和人工组)冠层截留量在小降雨事件下($PG<5$ mm)均占有很大的比例,当降雨量>15 mm 时,自然组(4.57%, $CV=73.38\%$)和人工组(5.25%, $CV=51.96\%$)平均截留率变异性相差最大。自然组和人工组中间锦鸡儿截留量与降雨量,降雨历时和降雨强度之间的关系用幂函数描述较好,截留率与三者的关系均用指数函数描述较好。在降雨特征相同的情况下,灌丛形态特征是影响中间锦鸡儿冠层截留的关键因素。

参考文献(References):

- [1] He Z B, Yang J J, Du J, Zhao W Z, Liu H, Chang X X. Spatial variability of canopy interception in a spruce forest of the semiarid mountain regions of China. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2014, 188: 58-63.
- [2] Davies-Barnard T, Valdes P J, Jones C D, Singarayer J S. Sensitivity of a coupled climate model to canopy interception capacity. *Climate Dynamics*, 2014, 42(7/8): 1715-1732.
- [3] Wang X P, Zhang Y F, Hu R, Pan Y X, Xu H J, Shi W, Jin Y X, Yasuda H. Revisit of event-based rainfall characteristics at Shapotou area in northern China. *Sciences in Cold and Arid Regions*, 2016, 8(6): 477-484.
- [4] 杨阳, 朱元骏, 安韶山. 黄土高原生态水文过程研究进展. *生态学报*, 2018, 38(11): 4052-4063.
- [5] Liang W, Yang Y T, Fan D M, Guan H D, Zhang T, Long D, Zhou Y, Bai D. Analysis of spatial and temporal patterns of net primary production and their climate controls in China from 1982 to 2010. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2015, 204: 22-36.
- [6] 杨磊, 张涵丹, 陈利顶. 黄土宽梁缓坡丘陵区次降雨对土壤水分补给效率与阈值研究. *中国科学: 地球科学*, 2018, 48(4): 457-466.
- [7] 樊才睿, 李畅游, 贾克力, 孙标, 史小红, 高宏斌. 不同放牧制度下呼伦湖流域草原植被冠层截留. *生态学报*, 2015, 35(14): 4716-4724.
- [8] Li Y, Cai T J, Man X L, Sheng H C, Ju C Y. Canopy interception loss in a *Pinus sylvestris* var. *mongolica* forest of Northeast China. *Journal of Arid Land*, 2015, 7(6): 831-840.
- [9] Stringham T K, Snyder K A, Snyder D K, Lossing S S, Carr C A, Stringham B J. Rainfall interception by Singleleaf Piñon and Utah juniper: implications for stand-level effective precipitation. *Rangeland Ecology & Management*, 2018, 71(3): 327-335.
- [10] 徐丽宏, 时忠杰, 王彦辉, 熊伟, 于澎涛. 六盘山主要植被类型冠层截留特征. *应用生态学报*, 2010, 21(10): 2487-2493.
- [11] Kermavnar J, Vilhar U. Canopy precipitation interception in urban forests in relation to stand structure. *Urban Ecosystems*, 2017, 20(6): 1373-1387.
- [12] Liu Z B, Wang Y H, Tian A, Liu Y, Webb A A, Yang Y R, Zuo H J, Yu P T, Xiong W, Xu L H. Characteristics of canopy interception and its simulation with a revised Gash model for a larch plantation in the Liupan Mountains, China. *Journal of Forestry Research*, 2018, 29(1): 187-198.
- [13] Chen T W, Nguyen T M N, Kahlen K, Stützel H. Quantification of the effects of architectural traits on dry mass production and light interception of tomato canopy under different temperature regimes using a dynamic functional-structural plant model. *Journal of Experimental Botany*, 2014, 65(22): 6399-6410.

- [14] Sun J M, Yu X X, Wang H N, Jia G D, Zhao Y, Tu Z H, Deng W P, Jia J B, Chen J G. Effects of forest structure on hydrological processes in China. *Journal of Hydrology*, 2018, 561: 187-199.
- [15] Wang X P, Zhang Y F, Hu R, Pan Y X, Berndtsson R. Canopy storage capacity of xerophytic shrubs in Northwestern China. *Journal of Hydrology (Amsterdam)*, 2012, 454-455: 152-159.
- [16] 孙忠林, 王传宽, 王兴昌, 张全智. 两种温带落叶阔叶林降雨再分配格局及其影响因子. *生态学报*, 2014, 34(14): 3978-3986.
- [17] Toba T, Ohta T. Factors affecting rainfall interception determined by a forest simulator and numerical model. *Hydrological Processes*, 2008, 22(14): 2634-2643.
- [18] Iida S, Levia D F, Nanko K, Sun X C, Shimizu T, Tamai K, Shinohara Y. Correction of canopy interception loss measurements in temperate forests: a comparison of necessary adjustments among three different rain gauges based on a dynamic calibration procedure. *Journal of Hydrometeorology*, 2018, 19(3): 547-553.
- [19] Fathizadeh O, Attarod P, Pypker T G, Darvishsefat A A, Amiri G Z. Seasonal variability of rainfall interception and canopy storage capacity measured under individual oak (*Quercus brantii*) trees in western Iran. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 2013, 15: 175-188.
- [20] Zimmermann A, Wilcke W, Elsenbeer H. Spatial and temporal patterns of throughfall quantity and quality in a tropical montane forest in Ecuador. *Journal of Hydrology*, 2007, 343(1/2): 80-96.
- [21] Cuartas L A, Tomasella J, Nobre A D, Hodnett M G, Waterloo M J, Múnera J C. Interception water-partitioning dynamics for a pristine rainforest in Central Amazonia: marked differences between normal and dry years. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2007, 145(1/2): 69-83.
- [22] Jetten V G. Interception of tropical rain forest: performance of a canopy water balance model. *Hydrological Processes*, 1996, 10(5): 671-685.
- [23] Llorens P, Domingo F. Rainfall partitioning by vegetation under Mediterranean conditions. A review of studies in Europe. *Journal of Hydrology*, 2007, 335(1/2): 37-54.
- [24] 荐圣淇, 赵传燕, 方书敏, 余凯, 王阳, 柳逸月, 郑祥霖, 彭守璋. 黄土高原丘陵沟壑区柠条和沙棘灌丛的降雨截留特征. *应用生态学报*, 2012, 23(9): 2383-2389.
- [25] 王正宁, 王新平, 刘博. 荒漠灌丛内降雨和土壤水分再分配. *应用生态学报*, 2016, 27(3): 755-760.
- [26] Zhang Y F, Wang X P, Hu R, Pan Y X, Paradeloc M. Rainfall partitioning into throughfall, stemflow and interception loss by two xerophytic shrubs within a rain-fed re-vegetated desert ecosystem, northwestern China. *Journal of Hydrology*, 2015, 527: 1084-1095.
- [27] Zhang Z S, Zhao Y, Li X R, Huang L, Tan H J. Gross rainfall amount and maximum rainfall intensity in 60-minute influence on interception loss of shrubs: a 10-year observation in the Tengger Desert. *Scientific Reports*, 2016, 6: 26030.
- [28] Li Q X, Wang Y S, Zhu Y J, Li H, Jia Z Q, Liu H T. Effects of soil improvement of *Caragana intermedia* plantations in alpine sandy land on Tibet Plateau. *Acta Ecologica Sinica*, 2014, 34(2): 123-128.
- [29] 戴雅婷, 侯向阳, 闫志坚, 吴洪新, 解继红, 张晓庆, 高丽. 库布齐沙地两种植被恢复类型根际土壤微生物和土壤化学性质比较研究. *生态学报*, 2016, 36(20): 6353-6364.
- [30] 周静静, 马红彬, 周瑶, 蔡育荣, 吴兴旺, 宿婷婷, 贾希洋. 荒漠草原不同带间距人工柠条林平茬对林间生境的影响. *草业学报*, 2017, 26(5): 40-50.
- [31] 宋乃平, 杨明秀, 王磊, 王兴, 肖绪培, 曲文杰. 荒漠草原区人工柠条林土壤水分周年动态变化. *生态学杂志*, 2014, 33(10): 2618-2624.
- [32] 赵伟, 杨明秀, 陈林, 王磊, 宋乃平, 杨新国. 荒漠草原人工柠条林草本层植被的结构与动态. *浙江大学学报: 农业与生命科学版*, 2015, 41(6): 723-731.
- [33] Li X R, Zhang Z S, Tan H J, Gao Y H, Liu L C, Wang X P. Ecological restoration and recovery in the wind-blown sand hazard areas of northern China: relationship between soil water and carrying capacity for vegetation in the Tengger Desert. *Science China Life Sciences*, 2014, 57(5): 539-548.
- [34] 杨新国, 赵伟, 陈林, 王磊, 宋乃平. 荒漠草原人工柠条林土壤与植被的演变特征. *生态环境学报*, 2015, 24(4): 590-594.
- [35] Naharuddin, Bratawinata A, Hardwinarto S, Pitopang R. Canopy interception on tree architecture models of aubreville, stone and leeuwenberg in lore lindu national park area, Indonesia. *Journal of Biodiversity and Environmental Sciences*, 2017, 10(2): 75-88.
- [36] Carlyle-Moses D E. Throughfall, stemflow, and canopy interception loss fluxes in a semi-arid Sierra Madre Oriental matorral community. *Journal of Arid Environments*, 2004, 58(2): 181-202.
- [37] Brauman K A, Freyberg D L, Daily G C. Forest structure influences on rainfall partitioning and cloud interception: a comparison of native forest sites in Kona, Hawai'i. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2010, 150(2): 265-275.
- [38] 徐先英, 严平, 郭树江, 柴成武. 干旱荒漠区绿洲边缘典型固沙灌木的降水截留特征. *中国沙漠*, 2013, 33(1): 141-145.
- [39] 杨志鹏, 李小雁, 孙永亮, 刘连友, 张晓影, 马育军. 毛乌素沙地沙柳灌丛降雨截留与树干茎流特征. *水科学进展*, 2008, 19(5): 693-698.
- [40] 李奕, 蔡体久, 满秀玲, 田野宏. 大兴安岭地区天然樟子松林降雨截留再分配特征. *水土保持学报*, 2014, 28(2): 40-44.

- [41] Zhang Z S, Li X R, Dong X J, Jia X H, He M Z, Tan H J. Rainfall interception by sand-stabilizing shrubs related to crown structure. *Sciences in Cold and Arid Regions*, 2009, 1(2): 107-119.
- [42] 刘亚, 阿拉木萨, 曹静. 科尔沁沙地樟子松林降雨再分配特征. *生态学杂志*, 2016, 35(8): 2046-2055.
- [43] 胡鹏, 朗明翰, 吴晗玉, 郭娜, 蔡体久, 盛后财. 兴安落叶松林降雨再分配特征. *干旱区资源与环境*, 2018, 32(4): 138-143.
- [44] 李晶晶, 白岗栓. 黄土丘陵沟壑区苹果树冠截留规律. *应用生态学报*, 2013, 24(2): 379-387.
- [45] 陈书军, 陈存根, 邹伯才, 张硕新, 王得祥, 侯琳. 秦岭天然次生油松林冠层降雨再分配特征及延滞效应. *生态学报*, 2012, 32(4): 1142-1150.
- [46] 方书敏, 赵传燕, 荐圣淇, 余凯. 陇中黄土高原油松人工林林冠截留特征及模拟. *应用生态学报*, 2013, 24(6): 1509-1516.
- [47] 周秋文, 马龙生, 颜红, 蔡明勇, 戴丽. 贵州省喀斯特阔叶林降雨截留分配特征. *水土保持通报*, 2016, 36(6): 321-325.
- [48] 刘章文, 陈仁升, 宋耀选, 韩春坛. 祁连山典型灌丛降雨截留特征. *生态学报*, 2012, 32(4): 1337-1346.
- [49] 岳祥飞, 崔建垣, 张铜会, 王少昆, 连杰, 王新源, 云建英. 科尔沁沙地黄柳灌丛降雨截留与再分配特征. *草业学报*, 2013, 22(6): 46-52.
- [50] 王新平, 康尔泗, 张景光, 李新荣. 荒漠地区主要固沙灌木的降水截留特征. *冰川冻土*, 2004, 26(1): 89-94.