

排土场典型树种穿透雨空间分布特征

李紫晴¹, 王金满^{1,2}, 时文婷¹, 王悦¹, 徐启胜¹, 王敬朋¹

(1.中国地质大学(北京),土地科学技术学院,北京 100083;2.自然资源部土地整治重点实验室,北京 100035)

摘要: 穿透雨是降雨再分配的主要组成成分,影响植被生长以及土壤水分分布情况,研究矿区典型树种穿透雨特征对生态恢复具有重要意义。以平朔矿区南排土场典型树种为研究对象,利用地统计学方法与时间稳定性图对比分析了油松(*Pinus tabulaeformis*)、刺槐(*Robinia pseudoacacia*)、白杜(*Euonymus maackii*)、小叶锦鸡儿(*Caragana microphylla*)和木半夏(*Elaeagnus multiflora*)的穿透雨空间分布特征。结果表明:(1)平均穿透率由大到小为木半夏、小叶锦鸡儿、油松、白杜、刺槐,穿透率变异系数由大到小依次为白杜、木半夏、小叶锦鸡儿、油松、刺槐。(2)油松、刺槐、白杜、小叶锦鸡儿与木半夏的穿透率均随降雨量的增加而增加,最后达到平稳状态,降雨量增大,穿透率变异系数先快速下降,最后达到平稳状态,并都以对数函数拟合效果最好。(3)5 种树种穿透率的基台值均随着降雨量增加呈指数减小,块金系数随着降雨量的上升而增加,表明随着降雨量的上升,冠层穿透率在空间上趋于均匀化,随机因素带来的空间变异性逐渐增大。此外,5 种树种在植株冠层中部和外缘部分均出现穿透率高于 100%的情况。(4)灌木穿透雨分布格局的时间稳定性比乔木高,冠层接近基部和外缘出现穿透雨极端稳定性,接近植被基部多为极端干燥状态,冠层外缘多为极端湿润状态。(5)从穿透率大小及其空间变异性考虑,在排土场水土流失地区刺槐为最佳重建植被类型选择,穿透雨在植被冠幅边缘出现持续湿润状态,可种植一些灌木来截留一部分穿透雨。研究结果增进对矿区排土场生态水文过程的认识,可为矿区排土场重建植被选择提供理论基础。

关键词: 排土场; 穿透雨; 地统计学; 空间异质性; 时间稳定性

中图分类号: S715.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-2242(2022)06-0271-09

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcxb.2022.06.033

Spatial Distribution Characteristics of the Throughfall for
Typical Tree Species in Dump Site

LI Ziqing¹, WANG Jinman^{1,2}, SHI Wenting¹, WANG Yue¹, XU Qisheng¹, WANG Jingpeng¹

(1.School of Land Science and Technology, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083;

2.Key Laboratory of Land Consolidation and Rehabilitation, Ministry of Natural Resources, Beijing 100035)

Abstract: Throughfall is the main component of rainfall redistribution, which affects vegetation growth and soil moisture distribution. Taking the typical tree species in the southern dump of Pingshuo mining area as the research object, the spatial distribution characteristics of throughfall of *Pinus tabulaeformis*, *Robinia pseudoacacia*, *Euonymus maackii*, *Caragana microphylla* and *Elaeagnus multiflora* were compared and analyzed by using geostatistical methods and time stability plots. The average throughfall percent from large to small was: *Elaeagnus multiflora*, *Caragana microphylla*, *Pinus tabulaeformis*, *Euonymus maackii*, *Robinia pseudoacacia*. The coefficient of variability of throughfall percent from large to small was *Euonymus maackii*, *Elaeagnus multiflora*, *Caragana microphylla*, *Pinus tabulaeformis*, *Robinia pseudoacacia*. The throughfall percent of *Pinus tabulaeformis*, *Robinia pseudoacacia*, *Euonymus maackii*, *Caragana microphylla* and *Elaeagnus multiflora* increased with the increase of rainfall, and finally reached a steady state, and the coefficient of variability of throughfall percent decreased rapidly with the increase of rainfall, and finally reached a steady state, and the logarithmic function was the best fitting effect. The still of throughfall percent decreased exponentially with the increase of rainfall, and the nugget coefficient increased with the increase of rainfall, indicating that with the increase of rainfall, the throughfall percent tended to be uniform in space, and the spatial heterogeneity caused by random factors gradually increased. Moreover, the

收稿日期: 2022-04-28
资助项目: 国家自然科学基金项目(41877532)
第一作者: 李紫晴(1996—), 女, 在读硕士研究生, 主要从事土地整治与生态修复研究。E-mail: q15931890673@163.com
通信作者: 王金满(1979—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事土地整治与生态修复研究。E-mail: wangjinman@cugb.edu.cn

throughfall percent of the five tree species was higher than 100% in the middle and outer parts of the plant canopy. The temporal stability of the distribution pattern of throughfall shrubs was higher than that of trees. The canopy near the base and the outer edge of the canopy showed extreme persistence of throughfall. The base near the vegetation was mostly in an extremely dry state, and the outer edge of the canopy was mostly in an extremely wet state. Considering the throughfall percent and its spatial variability, *Robinia pseudoacacia* was the best choice of vegetation type for reconstruction in soil erosion areas. The throughfall appeared continuously wet at the edge of the vegetation canopy, and some shrubs could be planted to intercept part of the throughfall. These research results could enhance the understanding of the ecological and hydrological process of the mining dump, and provide a theoretical basis for the selection of vegetation for the reconstruction of the mining dump.

Keywords: dump site; throughfall; geostatistics; spatial variability; temporal stability

在水分缺乏地区,降雨对土壤水分的有效补给决定植被生长的可持续性^[1]。降雨量在穿过植被冠层时分为冠层截留、穿透雨和树干茎流,改变降雨在水平和垂直方向上的分布,提高土壤水分的时空变异性^[2]。作为冠层下主要的降雨成分,穿透雨与一系列重要的生态、水文和生物地球化学过程相关,包括壤中流的空间分布^[3]、土壤侵蚀^[4]、根系分布与生长^[5]和土壤微生物群落结构^[6]。因此,了解穿透雨特征对于改善重建植被陆地生态系统的水文和生物地球化学循环特征至关重要。

露天开采导致生态失衡和土地资源损失^[7],我国露天煤矿多处于干旱、半干旱的生态脆弱区^[8],进一步加大矿区土地的破坏程度与生态恢复治理难度。排土场是在露天采矿的过程中集中堆积煤矸石、土壤、岩石等的场地,既有严重压实情况又存在水土流失危险,对其复垦主要包括地貌重塑、土壤重构、植被重建、景观重现和生物多样性重组与保护^[9]。该区生态环境脆弱,其降雨损失、土壤入渗、径流等都与植被有关,因此研究矿区排土场典型树种的水文过程十分有必要。

目前,越来越多的学者对植被穿透雨的时空特征进行研究,如邓文平等^[10]对庐山自然保护区中日本柳杉(*Cryptomeria japonica*)人工林穿透雨时空分布特征的研究表明,穿透率空间分布与叶面积指数和降雨量密切相关;而且离树干远近和降雨量影响海南岛槟榔(*Areca catechu* L.)林穿透雨的时间稳定性^[11];对半干旱山地生态系统保护区内青海云杉(*Picea crassifolia*)林穿透雨变异性研究^[12]发现,林冠结构和降雨特征的空间变异性对穿透雨的空间变异性有显著影响;而我国东北兴安落叶松(*Larix gmelinii*)穿透雨变异主要受降雨量和冠层厚度的影响,并且穿透雨的空间分布在时间上是稳定的^[13];Zhang 等^[14]分别使用变异函数拟合、标准化排序和滤纸染色对香蕉(*Musa nana* Lour.)树下穿透雨的空间异质性、时间稳定性和雨滴大小进行研究表明,穿透雨具有较高的空间变异性,受降雨大小的影响显示出较高的时间变异性,主要受不稳定的香蕉树冠层结构影

响。大多数的研究主要集中在热带亚热带森林^[15-18]和干旱半干旱地区^[19-20]等,而对于露天煤矿典型树种的穿透雨研究较少。黄土高原水土流失严重,而黄土丘陵地区的露天煤矿生境更是非常脆弱,水分影响该地区的植被重建^[21],植被反过来又影响该地区水分分布^[22]。因此,本研究以平朔矿区南排土场的典型树种为研究对象,利用地统计学和时间稳定性图讨论穿透雨的空间分布特征及其时间稳定性,了解矿区重建植被对降雨在空间上的影响,为进一步探讨复垦矿区生态水文过程以及土壤水分空间差异分析提供理论依据,为今后矿区重建植被选择提供基础。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于山西省朔州市平鲁区平朔矿区安太堡露天煤矿南排土场(112°19'20"—112°20'35"E,39°27'10"—39°28'5"N)。南排土场面积为 187.66 hm²,排土高度达到 150 m。1992 年开始采用“草—灌—乔”的模式对其进行复垦,乔灌木相间分布或单品种乔(灌)林。目前,南排土场的植被覆盖率在 90% 以上。研究区年降雨量分布不均匀,主要集中在 7—9 月,这 3 个月的降雨量占全年降雨量的 75% 以上。研究区位于黄土高原东部,是典型的干旱半干旱大陆性季风气候区,土壤物理风化严重,多出现侵蚀现象,土壤十分贫瘠,大规模的露天开采使该地区水土流失较严重。

1.2 试验样地的选取

本试验于 2021 年 7—8 月在平朔矿区安太堡露天煤矿南排土场的植被恢复区进行。随机在平朔矿区南排土场平台选取 3 块不同类型的样地作为重建乔木和灌木的试验样地。3 块样地的具体信息见表 1。对 3 块样地进行每木检尺,分别测量样地内树种的株高、冠幅,以及乔木的胸径、灌木的基径。分别选择与样地内所测植被特征平均值相近且没有其他植被遮挡的各 3 株油松(*Pinus tabulaeformis*)、刺槐(*Robinia pseudoacacia*)、白杜(*Euonymus maackii*)、小叶锦鸡儿(*Caragana microphylla*)、木半夏(*Elaeagnus multiflora*)为样本进行研究(表 2)。

表 1 穿透雨观测样地概况

样地种类	样地规格/m	植被类型	平均行距/cm	平均株距/cm	密度/(株·hm ⁻²)	郁闭度
样地 1	20×20	油松、白杜、木半夏	253.33	160.00	2175	0.35
样地 2	20×10	刺槐	280.00	242.50	1250	0.30
样地 3	20×10	小叶锦鸡儿	—	—	—	—

表 2 样本植被特征平均值

树种	株高/ m	胸径 (基径)/cm	冠幅/ m
油松	3.08	24.00	1.85
刺槐	3.97	24.67	2.14
白杜	3.79	15.50	1.93
小叶锦鸡儿	1.01	1.19	1.10
木半夏	2.30	4.48	1.56

1.3 野外人工降雨装置

降雨装置主要由动力系统、供水系统、降雨喷头、降雨支架等组成。动力系统主要由发电机、可调压力水泵等组成,供水系统由流量计、调节阀门、储水池等组成(图 1)。降雨装置高度在 5 m 左右,在正式试验之前进行反复率定,使装置达到 20,50,80 mm/h 雨强的同时保证降雨均匀度达到 80%。每种样本进行 3 种雨强的降雨,降雨时长分别为 10,20,30,35 min,每场降雨间隔在 24 h 以上,模拟降雨选择在相同时间段、相同气象条件进行,并且尽量选择在无风情况下。本试验设计不同降雨强度与降雨历时,得到的降雨量大小范围为 3.3~46.7 mm,可用于代表自然降雨的小雨(0.1~10 mm)、中雨(10~25 mm)、大雨(25~50 mm)等情况。每场降雨中在空地随机放置 3 个雨量器用于降雨量的测量,经测量显示实际降雨量与所设定的降雨量基本一致。

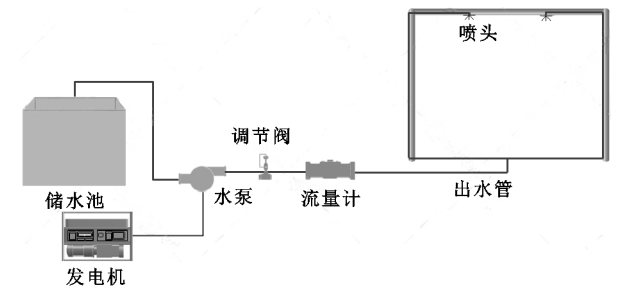


图 1 降雨装置示意

1.4 穿透雨收集

本研究中重建乔木穿透雨采用开口直径为 9 cm,高为 18 cm 的聚乙烯瓶收集,灌木穿透雨采用开口直径为 5.6 cm、高为 12.6 cm 的聚乙烯瓶收集。将聚乙烯瓶按照 0°,90°,180°,270°辐射方向(即正北、正东、正南、正西 4 个方向)放置在以植被基部为圆心的半径上,每个方向上在距离茎干 10,30,50 cm 处放置收集瓶。每次人工降雨结束后立即用量筒分别测量每个聚乙烯瓶中的降雨量。为了避免其他植被对本

试验影响,在摆放聚乙烯瓶前首先把植被冠层下面的杂草清理干净,并把该区土壤铲平。

1.5 地统计学方法

通过地统计软件 GS+对植被穿透率进行半方差函数及其参数的计算,并分析冠层下穿透率的异质性,利用地统计软件中不同类型半变异模型,对不同降雨量条件下单株植被穿透率数据进行拟合,通过相关参数分析单株植被穿透率的空间相关程度。以所计算的半方差函数的各个参数为基础,利用 ArcGIS 10.7 软件对每种植被类型单株冠层下的穿透率进行普通克里金插值分析。

通过单样本 K-S 检验对数据正态性进行检验,结果显示数据基本符合正态分布。半方差函数表示 2 点之间插值方差的 1/2,表达式为:

$$\gamma(h)=\frac{1}{2n(h)}\sum_{i=1}^{n(h)}[z(x_i)-z(x_i+h)]^2 \tag{1}$$

式中: γ 为半方差函数值; $z(x_i)$ 为在 x_i 处的观测点 z 的穿透率; $z(x_i+h)$ 是与 x_i 距离为 h 处观测点的穿透率; $n(h)$ 为距离等于 h 时的穿透雨观测点的个数, h 为观测点间距,又称位差(lag),是穿透雨收集器间的距离^[23]。

半方差函数主要参数:(1)块金值(C_0)是指当观测点距离(h)为 0 时 $\gamma(h)$ 对应的值,表示区域化变量比抽样尺度小时的非连续变异。(2)基台值(C_0+C)是当变异函数随着距离 h 的增大最终达到的 1 个常数,表示最大变异。通常情况下,基台值越大,表明空间变异性越大。(3)变程是当 $\gamma(h)$ 达到基台值时的距离。此外,块金系数 $[C_0/(C_0+C)]$ 表示的是随机部分在空间变异性中所占的比重^[24]。

分形维数(D)表示空间自相似性, $\gamma(h)$ 与 h 之间的关系可以确定分形维数:

$$2\gamma(h)=h(4-2D) \tag{2}$$

对公式(2)取双对数后直线回归的斜率为 m ,分形维数(D)可由公式(3)计算得到:

$$D=\frac{1}{2}(4-m) \tag{3}$$

通过分形维数(D)确定空间变异的程度, D 值越小,穿透率的空间变异程度越高;反之则越低。

1.6 时间稳定性分析

为了评估穿透雨空间分布模式的时间稳定性,每个收集瓶在每个降雨事件中收集的穿透雨利用公式(4)进行标准化:

$$TFS_{ij}=\frac{TF_{ij}-Median_j}{MAD_j}\tag{4}$$

式中: TFS_{ij} 为标准化后观测点 i 在降雨事件 j 下的穿透雨; TF_{ij} 为观测点 i 在降雨事件 j 的穿透雨; $Median_j$ 为降雨事件 j 下穿透雨的中位数; MAD_j 为降雨事件 j 下穿透雨的绝对中位差^[25]。将标准化穿透雨的均值按照从小到大的顺序绘制时间稳定性图, 误差棒为 95% 置信区间。

从时间稳定性图中可以得出 2 种时间稳定性: (1) 极端稳定性(extreme persistence): 标准化穿透雨的均值在样本四分位以外, 在上四分位的点代表非常干燥的状态(屏蔽效应), 在下四分位的点代表非常湿润的状态(滴水效应); (2) 一般稳定性(general persistence): 标准化穿透雨的均值在样本四分位以内。误差棒的长短代表时间不稳定程度, 误差棒越长, 意味着该点的时间稳定性较差, 反之则时间稳定性好。误差棒与零轴相交, 则表示该点的穿透雨在时间上是不稳定的^[11,26]。

2 结果与分析

2.1 穿透雨特征及其变异性

在试验期间每种树种共观测到的穿透量、穿透率、穿透率变异系数见表 3。由表 3 可以看出, 乔木平均穿透率的大小为油松(83.14%)>白杜(81.25%)>刺槐(74.58%), 针叶林叶片持水力要比阔叶林差, 而白杜叶片较刺槐光滑且叶面积指数较低。2 种灌木平均穿透率的大小为木半夏(86.02%)>小叶锦鸡儿(85.17%), 主要是因为小叶锦鸡儿茎干上面有很多小刺, 会阻挡一部分穿透雨, 而木半夏叶片则相对要光滑一些, 不利于雨水的储存。总体上, 乔木比灌木的穿透率低。

表 3 穿透雨特征

树种	穿透量/mm	穿透率/%	变异系数/%
油松	197.53	83.14	20.34
刺槐	177.20	74.58	19.14
白杜	193.05	81.25	26.84
小叶锦鸡儿	202.35	85.17	20.86
木半夏	204.39	86.02	24.52

次降雨的穿透率大小受降雨特征影响明显, 分别对 3 种乔木和 2 种灌木穿透率与降雨量的关系拟合发现, 两者呈显著对数函数关系。由图 2 可知, 降雨量增大, 油松、刺槐、白杜和小叶锦鸡儿、木半夏冠层内穿透率先快速增大, 而后趋于平稳。油松、刺槐和白杜在 0~25 mm 的降雨量时, 穿透率随着降雨量的增大明显增加, 在降雨量>25 mm 后, 穿透率逐渐达到平稳, 而小叶锦鸡儿和木半夏在 0~15 mm 的降雨量时, 穿透率随着降雨量的增加快速上升, 而后逐渐达到平稳状态。

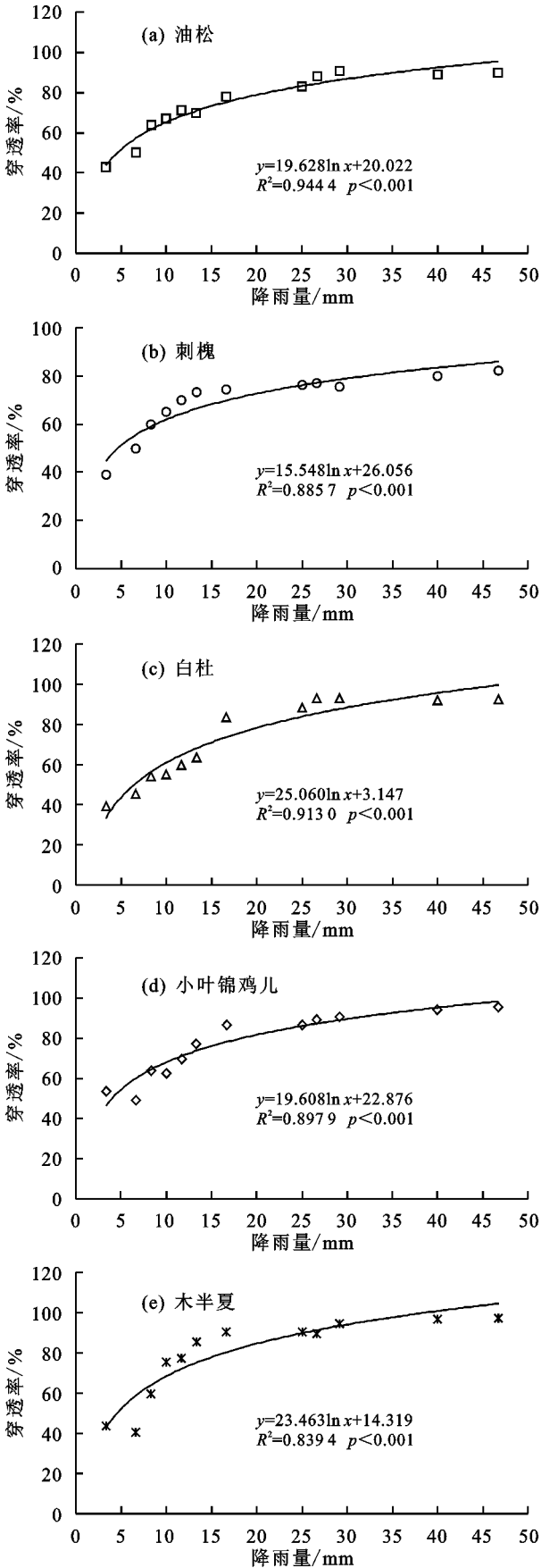


图 2 穿透率与降雨量的关系

不同的降雨量与对应的 5 种树种穿透率的变异系数绘制散点图(图 3)可知, 5 种树种穿透率的变异系数均随着降雨量的增加呈现下降的趋势, 用对数函

数进行拟合效果较好。由图 3 可以看出,5 种树种在降雨量 $<20\text{ mm}$ 时,穿透率变异系数均随降雨量增

大快速下降,当降雨量 $>20\text{ mm}$ 后,各穿透率变异系数开始达到平稳状态,在 20%左右。

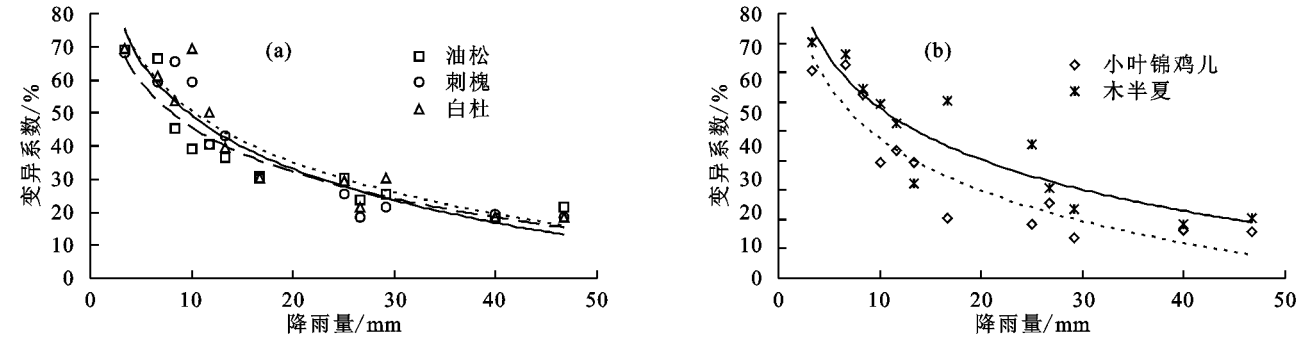


图 3 穿透率变异系数与降雨量的关系

2.2 穿透率空间异质性分析

由图 4 可以得出,3 种乔木和 2 种灌木单株冠层穿透率的基台值(C_0+C)均随着降雨量增大而下降,以指数函数拟合效果最好,表明随着降雨量的增加,3 种乔木和 2 种灌木的穿透率在空间上逐渐均匀化,在

小雨量时,灌木的基台值(C_0+C)要比乔木的大,说明在小雨量时灌木穿透雨空间变异性比乔木大。小叶锦鸡儿在不同降雨量时 C_0+C 变化较大,表明其穿透率空间变异性随降雨量变化程度较大。

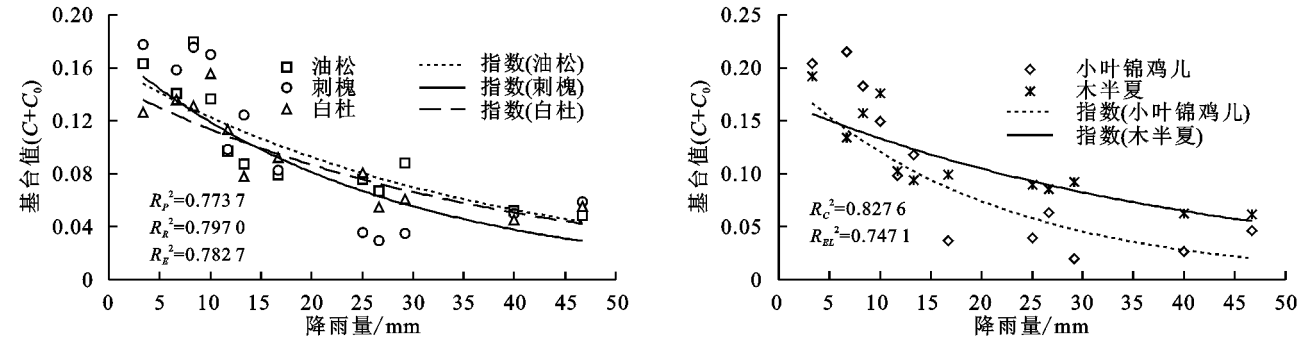


图 4 穿透率的基台值(C_0+C)随降雨量的变化

图 5 为块金系数 $[C_0/(C_0+C)]$ 随降雨量增大所表现出来的规律,块金系数表示由随机部分在空间异质中的占比。可以得出穿透率的块金系数随着降雨量的增加而增加,表明随着降雨量的增加,在空间异质中随机部分的占比逐渐增大,与树冠结构的相关性逐渐降低。油松和小叶锦鸡儿在试验过程中穿

透率块金系数都小于 0.25,表现为极强的相关性,其空间变异主要与树冠结构有很大的相关性。其他树种基本在降雨量 $<30\text{ mm}$ 时,其块金系数 <0.25 ,表现为极强的相关性,在降雨量 $>30\text{ mm}$ 后,其块金系数在 0.25~0.75,为中等空间相关性,空间变异由随机因素与结构性因素决定。

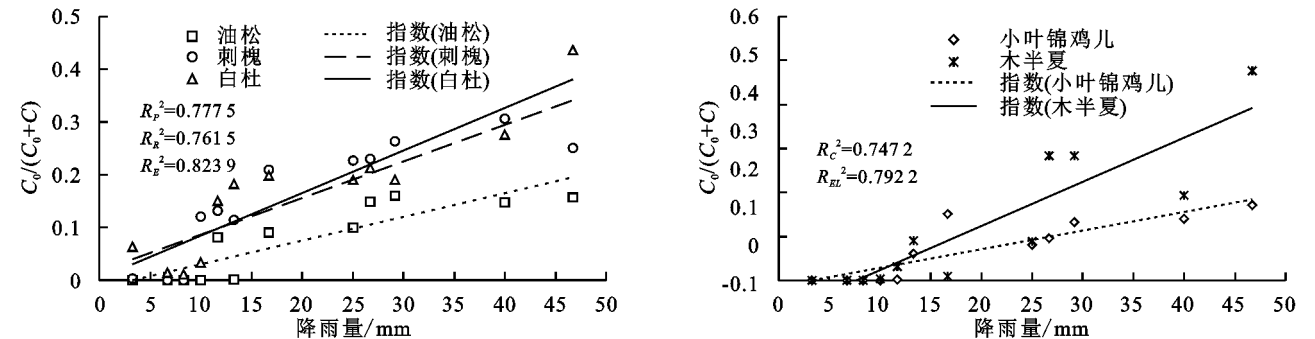


图 5 穿透率的 $C_0/(C_0+C)$ 随降雨量变化

按照小雨($0.1\sim10\text{ mm}$)、中雨($10\sim25\text{ mm}$)、大雨($25\sim60\text{ mm}$)的分类,计算各树种在不同雨量级下穿透率的半方差函数的参数(表 4),表 4 中总体指各观测点在所有降雨中穿透率平均值的总和。从表 4 可以看出,穿透率基台值(C_0+C)都随雨量级增大而减小,其

中,在小雨量级的木半夏穿透率基台值(C_0+C)最高,为 0.153 2,在大雨量级的刺槐最低,为 0.012 8,说明小雨量级的木半夏穿透率空间异质性最高,大雨量级的刺槐最低,整体上看灌木穿透率的基台值(C_0+C)基本上比乔木的大,表明在每种雨量级下灌木穿透率的空间异质性

比乔木高。渗透率的块金系数均随着雨量级的增大而增大,但都小于 0.25,表示只有很少一部分空间变异性由试验误差和随机因素引起。变程表示的是研究区内所研究变量在空间上最大相关距离,各树种在不同雨量级

下的单株冠层下渗透率的变程介于 34.5~79.8 cm,木半夏的变程更大一些。总体来看,木半夏渗透率基台值(C_0+C)最高,刺槐最低,表明整体上木半夏渗透率空间异质性最高,刺槐最低。

表 4 各树种在不同雨量级下渗透率的半方差函数理论模型及参数

树种	雨量级	理论模型	C_0	C_0+C	C_0/C_0+C	变程	R^2	RSS
油松	小雨	G	0.0001	0.0955	0.0010	65.9911	1.000	1.23E-07
	中雨	G	0.0001	0.0876	0.0011	54.2132	1.000	4.75E-07
	大雨	G	0.0001	0.0336	0.0030	43.3013	0.969	8.38E-06
	总体	G	0.0001	0.0464	0.0022	50.0563	0.985	9.01E-06
刺槐	小雨	G	0.0001	0.1032	0.0010	34.4678	0.382	2.95E-03
	中雨	S	0.0001	0.0402	0.0025	59.2000	0.550	3.48E-04
	大雨	G	0.0001	0.0128	0.0078	35.5070	0.207	1.26E-04
	总体	S	0.00001	0.0208	0.0005	49.6000	0.292	2.99E-04
白杜	小雨	G	0.0001	0.0659	0.0015	39.8372	0.924	7.47E-05
	中雨	G	0.0007	0.0585	0.0120	46.4190	0.999	3.00E-07
	大雨	G	0.0008	0.0526	0.0152	76.0370	1.000	3.79E-08
	总体	G	0.0001	0.0449	0.0022	58.5433	0.991	5.17E-06
小叶锦鸡儿	小雨	G	0.0001	0.1182	0.0008	46.9386	0.966	1.31E-04
	中雨	G	0.0001	0.0385	0.0026	46.9386	0.960	1.67E-05
	大雨	S	0.0007	0.0220	0.0327	48.8000	0.243	2.65E-04
	总体	G	0.0033	0.0468	0.0705	71.1873	0.999	2.35E-07
木半夏	小雨	S	0.0001	0.1532	0.0007	50.0000	0.333	1.26E-02
	中雨	G	0.0047	0.0583	0.0806	35.6802	0.981	7.40E-06
	大雨	G	0.0061	0.0509	0.1198	79.8475	0.999	8.72E-07
	总体	G	0.0058	0.1162	0.0499	81.0600	0.999	2.10E-06

注:G 表示高斯模型;S 表示球形模型。

把方位分成 2 个方向:东—西、南—北来进行研究,从图 6 可以看出,每种植被渗透率的分形维数

(D)在 2 个方向上均随着降雨量的增大缓慢增大,表明随着降雨量的增加,渗透率空间异质性程度减弱。

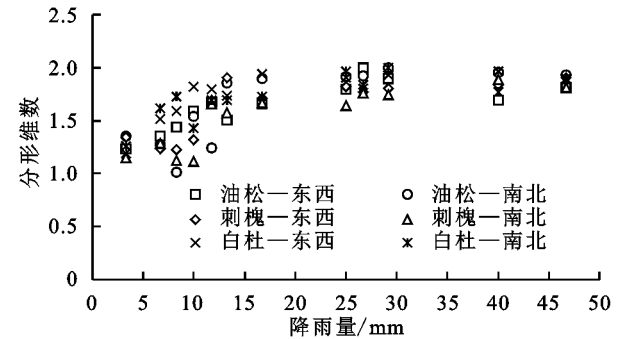
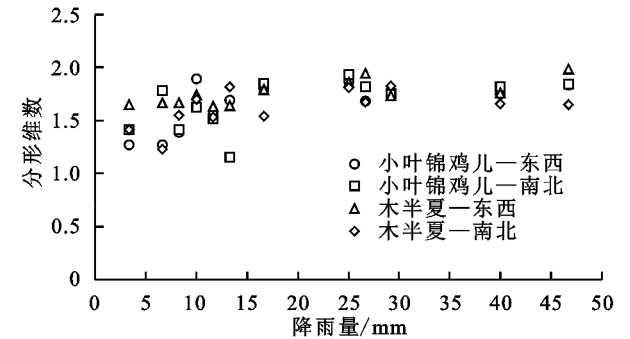


图 6 不同方向渗透率的分形维数(D)随降雨量的变化

2.3 渗透率的空间分布格局

本研究以所计算的半方差函数的各个参数为基础,利用 ArcGIS 10.7 软件对各树种单株冠层下的渗透率进行普通克里金插值分析。图 7 为单株冠层下在小雨量级、中雨量级、大雨量级条件下的渗透率以及总体渗透率的插值图。从图 7 可以看出,在每种雨量级下渗透率分布情况是明显不同的,各树种在小雨量级时的渗透率普遍不高,分布不均匀,在小雨量级下,油松的北部、刺槐的西部、白杜的西部、小叶锦鸡儿的北部、木半夏的北部渗透率较高。在中雨时,渗透率分布较均匀,其分布有一定代表性。大雨情况



下,渗透率继续增高,分布也较均匀。从总体渗透率来看,油松渗透率整体分布不均匀,北部、南部、东部外缘渗透率最高,并出现大于林外降雨的情况,这主要与油松树冠形状有关,油松枝条多为向外延伸并带有下垂的趋势,导致一些雨水汇集到树冠边缘,然后形成渗透雨;单株刺槐渗透率分布较均匀,在北部和西部出现最高渗透率;白杜在北部和西部出现最高渗透率,并高于林外降雨;小叶锦鸡儿在西部出现最高渗透率,并有大于林外降雨的现象,分布较均匀;木半夏总体来看分布较均匀。在树冠下都出现渗透率最小中心,其位置并不是严格位于植株中心。

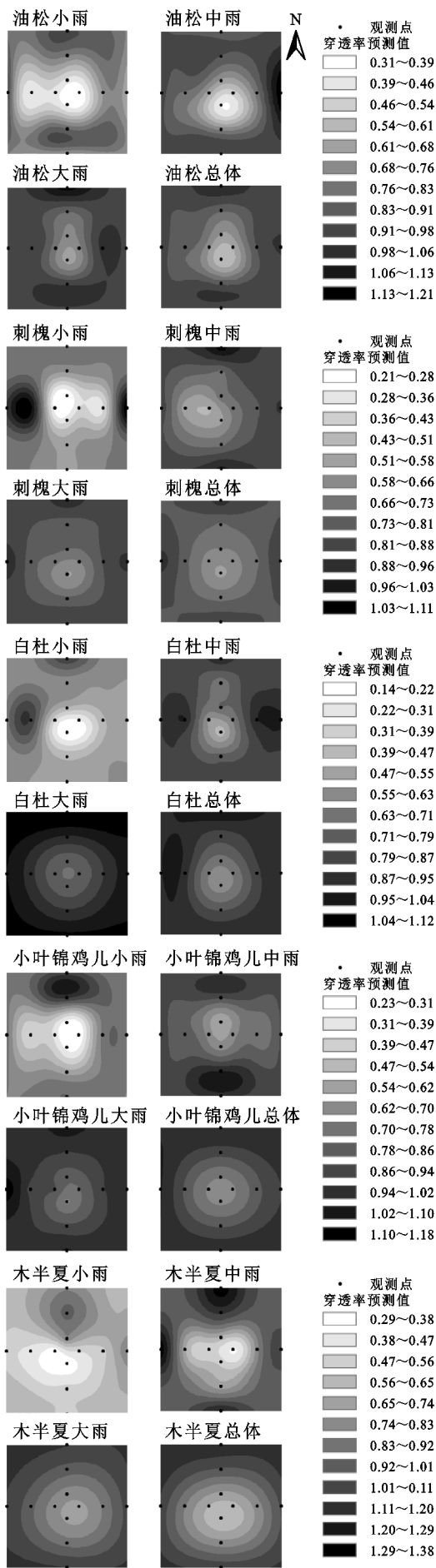


图 7 单株冠层下穿透率预测值

从图 7 可以看出,有些地方的穿透率高于 100%,说明这部分穿透量比林外降雨量大,主要是因为树冠结构和气象条件的影响导致“聚集效应”,多出现在植株冠层中部和外缘部分。

2.4 穿透雨时间稳定性特征

根据各树种单株冠幅下的 12 个观测点的时间稳定性图,划分标准化穿透雨上、下四分位数(图 8),其中油松标准化穿透雨上、下四分位数分别为 0.92, -1.20,3 个位点具有极端稳定性;刺槐标准化穿透雨上、下四分位数分别为 1.46, -1.38,5 个位点具有极端稳定性,1 个位点具有一般稳定性;白杜标准化穿透雨上、下四分位数分别为 1.44, -2.11,2 个位点具有极端稳定性,1 个位点具有一般稳定性;小叶锦鸡儿标准化穿透雨上、下四分位数分别为 1.34, -1.77,6 个位点具有极端稳定性,2 个位点具有一般稳定性;木半夏标准化穿透雨上、下四分位数分别为 0.78, -0.92,5 个位点具有极端稳定性,1 个位点具有一般稳定性。可以看出,灌木的时间稳定性比乔木好,其中小叶锦鸡儿的穿透雨时间稳定性最高,白杜的穿透雨时间变异程度最大。

图 8 中极端干燥状态的位点排在最前面,极端湿润状态的位点排在最后面,各树种都有非常干燥状态和非常湿润状态的位点,靠近植株基部的位点普遍呈现出极端的干燥状态,比如油松的南 1、东 1,刺槐的西 1、南 1,白杜的南 1,小叶锦鸡儿的南 1、北 1、东 1,木半夏的东 1、南 1、西 1。而靠近冠层边缘的位点则呈现出极端的湿润状态,比如油松的北 3,刺槐的西 3、北 3、东 3,白杜的北 3,小叶锦鸡儿的南 3、北 3、西 3,木半夏的西 3、北 3。可以看出,距离植株基部的距离影响穿透雨的时间稳定性,冠层的不同位置对穿透雨表现出不同的干湿状态。

3 讨论

3.1 典型树种对穿透雨特征影响

本研究中典型树种穿透率范围为 74.58%~86.02%,与黄土高原灌丛的 75.71%^[19]、晋西黄土区乔木的 86.3%^[27]等研究结论相似。根据各树种穿透雨特征可知,针叶林比阔叶林冠层持水能力差,乔木比灌木冠层持水能力好,这与学者张焜等^[28]得出的阔叶林要比针叶林冠层持水能力差相反,分析其原因认为,这主要与叶面积指数不同有关,而且研究所选月份不同。5 种树种的穿透率与降雨量的关系明显,均随着降雨量的增加而增加,最后达到平稳状态,说明植被冠层对降雨的储存存在最大值,前期冠层存储降雨没有达到饱和,穿透率较小,随着降雨的上升,冠层逐渐饱和,穿透率也逐渐增加,降雨继续增加,把之前附着在枝叶上的降雨振落下来,因此饱和后穿透率略有上升趋势。

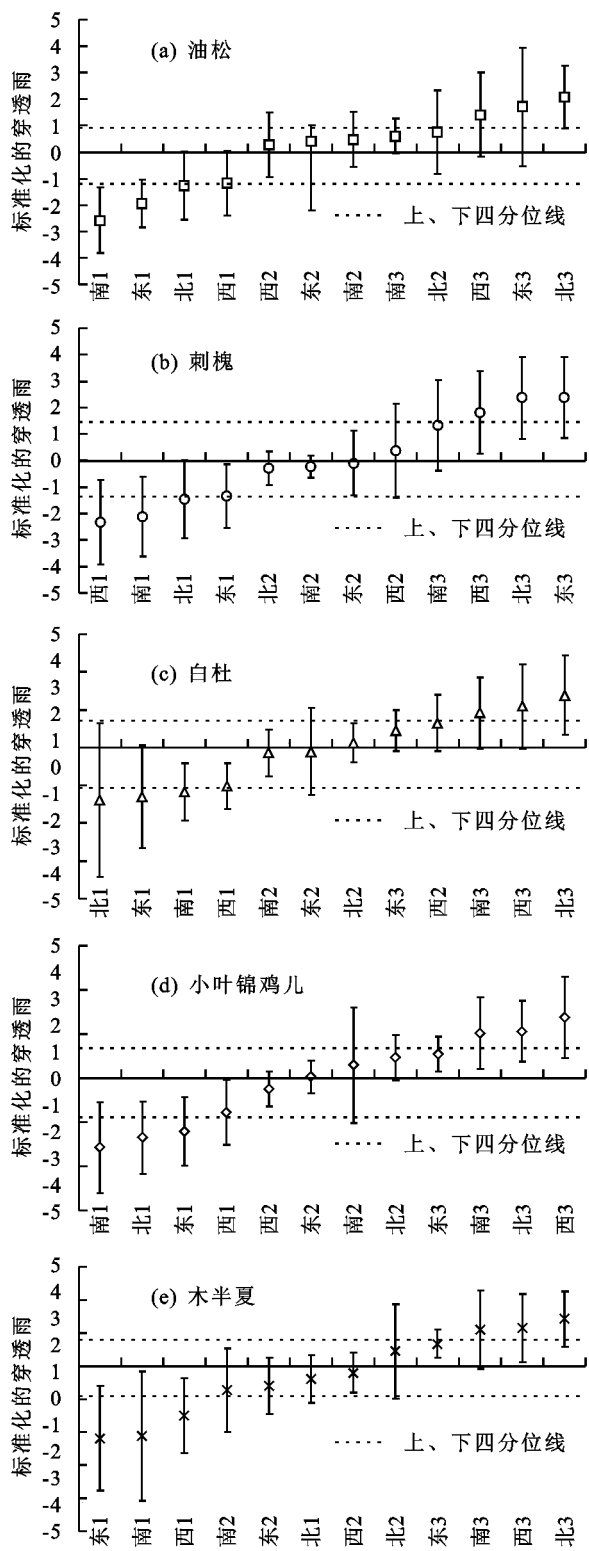


图 8 穿透雨时间稳定性

穿透率变异系数随着降雨量的上升先快速下降, 然后趋于平稳, 并以对数函数拟合效果最好。伊朗西部橡树(*Quercus brantii* var. *Persica*)林穿透雨空间变异系数随着降雨量增加而下降, 以对数函数拟合效果较好^[16]; 在对兴安落叶松(*Larix gmelinii*)林的穿透雨特征进行研究^[29]时发现, 穿透率随着降雨量的增加而增加, 树冠下穿透雨变异系数随降雨量的上升而减小, 以对数方程拟合最好; 而在陕北黄土高原地区

对柠条(*Caragana korshinskii*)灌丛穿透雨研究^[19]发现, 穿透雨空间变异系数与降雨量呈幂函数关系, 穿透雨的变异规律与本研究大体一致, 但是拟合方程存在不同, 这主要是因为不同的研究区、植被种类、降雨大小与穿透雨的空间分布格局有很大相关性。

3.2 典型树种对穿透率空间分布特征影响

利用地统计学对穿透率空间异质性进一步分析, 证明所测树种穿透率变异系数随着降雨量的增加而减小, 在对宁夏六盘山华北落叶松(*Larix principis-rupprechtii*)穿透雨的空间异质性研究^[23]中也得出此结论。通过对单株冠层下穿透率进行插值预测发现, 在树冠下穿透率都有 1 个最小中心, 其位置并不是严格位于植株中心, 这可能受周围环境影响。冠层下一些地方出现穿透率高于 100% 的情况, 说明这部分穿透量要比林外降雨量大, 主要是因为树冠结构和气象条件的影响导致“聚集效应”, 多出现在植株冠层中部和外缘部分。庐山自然保护区的日本柳杉(*Cryptomeria japonica*)^[10]、陕北黄土高原柠条(*Caragana korshinskii*)^[19]均得出此结论。

在对各植株穿透雨分布格局时间稳定性研究中发现, 冠层下出现穿透雨极端稳定性, 多出现在植株基部和冠层边缘部分, 接近植株基部多为极端干燥状态, 冠层外缘多为极端湿润状态, 这主要是由植株冠层结构决定的, 植株枝条多为向四周分散, 附着在枝条上的雨水顺着枝条向下流, 接近茎部部分枝条顺着茎部流下, 成为树干茎流, 有些枝条上的雨水顺着枝条流向枝条末端, 因此接近茎部部分呈现极端干燥状态, 外缘出现极端湿润状态, 中部则表现出一一般稳定性或不稳定性, 这与中国半干旱山区青海云杉(*Picea crassifolia*)^[12]、干旱荒漠的柠条(*Caragana korshinskii*)和油蒿(*Artemisia ordosica*)^[30]研究结果一致。

3.3 重建植被模式选择与配置优化

根据本研究分析结果可知, 从植株冠层穿透率大小方面看, 刺槐平均穿透率最小, 乔木穿透率比灌木小, 在排土场易发生水土流失地区应考虑选择穿透率较小的植株, 比如刺槐等。从植株穿透率变异性方面来看, 刺槐冠层下穿透率变异性较小, 其次为油松, 穿透雨空间上的变异性影响土壤养分, 以及微生物的空间差异, 导致土壤质量差异。综上, 在排土场重建植被选择上以刺槐为最佳选择, 其次为油松, 考虑到经济等因素, 一些地区可以采取乔木与灌木混交。由于在冠层外缘出现持续湿润的状态, 因此可在乔木冠幅边缘种植一些灌木来截留一部分穿透雨。

基于本试验研究结果, 后续研究还应开展不同配置模式的植被冠层穿透雨特征研究, 结合土壤水分及养分情况分析其时空特征, 为排土场重建植被模式选择提供理论基础。

4 结 论

- (1)5 种典型树种穿透率大小为木半夏(86.02%)>小叶锦鸡儿(85.17%)>油松(83.14%)>白杜(81.25%)>刺槐(74.58%)。
- (2)5 种树种的穿透率变异系数均随着降雨量的增大而下降,并且基台值(C_0+C)随着降雨量增加呈指数函数减小,表示随着降雨量的增加,植株的穿透率在空间上逐渐均匀化。此外,随着降雨量的增加,树冠结构对穿透率的影响逐渐降低。
- (3)穿透雨时间稳定性方面,灌木的时间稳定性比乔木好,冠层下出现穿透雨极端稳定性,多出现在植株基部和冠层边缘部分,接近植株基部多为极端干燥状态,冠层外缘多为极端湿润状态,并且在冠层下出现穿透率>100%的现象。

参考文献:

[1] 田娜,古君龙,杨新国,等.荒漠草原中间锦鸡儿冠层截留特征[J].生态学报,2019,39(14):5279-5287.

[2] Johnson M S, Lehmann J. Double-funneling of trees: Stemflow and root-induced preferential flow[J]. *Ecoscience*,2006,13(3):324-333.

[3] Navar J, González J M, Gonzalez H. Gross precipitation and throughfall chemistry in legume species planted in Northeastern México[J]. *Plant and Soil*,2009,318(1/2):15-26.

[4] 马波,吴发启,马璠.种植大豆地表土壤溅蚀效应及其空间分布特征[J].土壤学报,2013,50(1):50-58.

[5] Schume H, Jost G, Katzensteiner K. Spatio-temporal analysis of the soil water content in a mixed Norway spruce (*Picea abies* (L.) Karst.)-European beech (*Fagus sylvatica* L.) stand[J]. *Geofisica Internacional*,2003,112(3):273-287.

[6] Rosier C L, Van Stan J T, Moore L D, et al. Forest canopy structural controls over throughfall affect soil microbial community structure in an epiphyte laden maritime oak stand[J]. *Ecohydrology*,2015,8(8):1459-1470.

[7] 蔡利平,李钢,史文中.增地节地型露天矿排土场优化设计[J].煤炭学报,2013,38(12):2208-2214.

[8] 张立平,张世文,叶回春,等.露天煤矿区土地损毁与复垦景观指数分析[J].资源科学,2014,36(1):55-64.

[9] 白中科,周伟,王金满,等.再论矿区生态系统恢复重建[J].中国土地科学,2018,32(11):1-9.

[10] 邓文平,郭锦荣,邹芹,等.庐山日本柳杉林下穿透雨时空分布特征[J].生态学报,2021,41(6):2428-2438.

[11] 赵赫,文志,刘艳秋,等.槟榔林冠穿透雨空间格局的时间稳定性[J].生态学报,2020,40(6):1967-1976.

[12] Zhu X, He Z B, Du J, et al. Spatial heterogeneity of throughfall and its contributions to the variability in near-surface soil water-content in semiarid mountains of China[J]. *Forest Ecology and Management*,2021,488:1-12.

[13] Sheng H C, Cai T J. Spatial variability of throughfall in a Larch (*Larix gmelinii*) forest in Great Kingan Mountain,

Northeastern China[J]. *Forests*,2021,12(4):e393.

[14] Zhang W J, Zhu X A, Chen C F, et al. Large broad-leaved canopy of banana (*Musa nana* Lour.) induces dramatically high spatial-temporal variability of throughfall[J]. *Hydrology Research*,2021,52(6):1223-1238.

[15] Rodrigues A F, Terra M C N S, Mantovani V A, et al. Throughfall spatial variability in a neotropical forest: Have we correctly accounted for time stability? [J]. *Journal of Hydrology*,2022,608:e127632.

[16] Fathizadeh O, Sadeghi S M M, Pazhouhan I, et al. Spatial variability and optimal number of rain gauges for sampling throughfall under single oak trees during the leafless period[J]. *Forests*,2021,12(5):e585.

[17] Zhang H X, Wu H W, Li J, et al. Spatial-temporal variability of throughfall in a subtropical deciduous forest from the hilly regions of eastern China[J]. *Journal of Mountain Science*,2019,16(8):1788-1801.

[18] 袁秀锦,肖文发,雷静品,等.三峡库区马尾松林穿透雨和树干茎流空间变异特征[J].林业科学,2020,56(1):10-19.

[19] 艾长江,高光耀,袁川,等.陕北黄土高原柠条灌丛穿透雨特征与影响因素[J].生态学报,2018,38(17):6063-6073.

[20] 杨新国,古君龙,王兴,等.荒漠草原中间锦鸡儿冠层穿透雨的发生与分布特征[J].干旱区研究,2019,36(1):131-138.

[21] 吕春娟,白中科,陈卫国.黄土区采煤排土场生态复垦工程实施成效分析[J].水土保持通报,2011,31(6):232-236.

[22] 杨国敏,王力.黑岱沟矿区排土场土壤水的氢氧稳定性同位素特征及入渗规律[J].煤炭学报,2015,40(4):944-950.

[23] 时忠杰,王彦辉,熊伟,等.单株华北落叶松树冠穿透降雨的空间异质性[J].生态学报,2006,26(9):2877-2886.

[24] 杨阳,李飒,何福耀,等.半变异函数及取样间距对克里金法在海洋地层分析中的影响研究[J].工程地质学报,2019,27(4):794-802.

[25] Zimmermann A, Germer S, Neill C, et al. Spatio-temporal patterns of throughfall and solute deposition in an open tropical rain forest[J]. *Journal of Hydrology*,2008,360(1):87-102.

[26] Zimmermann A, Zimmermann B, Elsenbeer H. Rainfall redistribution in a tropical forest: Spatial and temporal patterns[J/OL]. *Water Resources Research*,2009,45(11). <https://doi.org/10.1029/2008WR007470>.

[27] 次仁曲西,毕华兴,潘迪,等.晋西黄土区单株油松树下穿透雨空间分布特征研究[J].水土保持通报,2013,33(5):161-164.

[28] 张焜,张洪江,程金花,等.重庆四面山三种人工林林冠截留效应研究[J].水土保持研究,2011,18(1):201-204.

[29] 盛后财,蔡体久,俞正祥.大兴安岭北部兴安落叶松 (*Larix gmelinii*) 林下穿透雨空间分布特征[J].生态学报,2016,36(19):6266-6273.

[30] Zhang Y F, Wang X P, Hu R, et al. Throughfall and its spatial variability beneath xerophytic shrub canopies within water-limited arid desert ecosystems[J]. *Journal of Hydrology*,2016,539(2):406-416.