

降雨日间隔累积分布指数关系

郝丽珍¹, 刘国梁^{2*}, 董刚³, 张峰⁴, 乔嘉伟⁵

(1. 太原学院 计算机工程系, 山西 太原 030032; 2. 山西大学 环境与资源学院, 山西 太原 030006;
3. 山西大学 生命科学学院, 山西 太原 030006; 4. 山西大学 黄土高原研究所, 山西 太原 030006;
5. 山西省气象信息中心, 山西 太原 037006)

摘要: 利用山西省4个气象站1981—2021年的逐日降雨资料, 分季节探讨了“降雨日”(日降雨量 ≥ 1 mm)间隔累积分布。发现存在 $N/N_0=A\cdot\exp(-c\cdot t)$, 其中 N 是相邻“降雨日”间隔大于 t 的个数, A 与 c 是正拟合常数, N_0 是“间隔”总个数。 A 值在0.710至0.948之间, 且无明显季节和空间差异。 c 值, 夏季范围约在0.205 d⁻¹至0.328 d⁻¹之间; 冬季范围约在0.044 d⁻¹至0.057 d⁻¹之间; 春季和秋季接近, 范围约在0.118 d⁻¹至0.158 d⁻¹之间。假设单一季节“降雨日”为平稳独立随机变量, 推导的“降雨日”间隔累积分布与上述结果基本吻合。

关键词: 气象; 降雨; 随机变量; 时间间隔; 干旱评估

中图分类号: P426.6 文献标志码: A 文章编号: 0253-2395(2024)02-0435-06

Exponential Relationship of Rain-day Interval Cumulative Distribution

HAO Lizhen¹, LIU Guoliang^{2*}, DONG Gang³, ZHANG Feng⁴, QIAO Jiawei⁵

(1. Department of Computer Engineering, Taiyuan University, Taiyuan 030032, China;
2. School of Environmental Sciences and Resources, Shanxi University, Taiyuan 030006, China;
3. School of Life Science, Shanxi University, Taiyuan 030006, China;
4. Institute of Loess Plateau, Shanxi University, Taiyuan 030006, China;
5. Shanxi Meteorological Information Center, Taiyuan 037006, China)

Abstract: In this paper, the Rain-day Interval Cumulative Distribution (RICD) was investigated by season with the daily precipitation data of 4 meteorological stations in Shanxi Province from 1981 to 2021. A rain-day is a day with daily precipitation greater than or equal to 1 mm. It was found that there was an universal relationship of $N/N_0=A\cdot\exp(-c\cdot t)$, where N was the number of the intervals between the adjacent rain-days with length longer than t , A and c were the positive fitting constants, and N_0 was the total number of intervals. The A values ranged from 0.710 to 0.948, and there was no significant seasonal and spatial difference in A values. The c values ranged from 0.205 d⁻¹ to 0.328 d⁻¹ in summer, from 0.044 d⁻¹ to 0.057 d⁻¹ in winter. The c values in spring and autumn were close, ranging from 0.118 d⁻¹ to 0.158 d⁻¹. Assumed that the rain-day in a single season was a stationary independent random variable, the derived RICD was basically consistent with above results.

Key words: Meteorology; precipitation; random variable; time interval; drought assessment

0 引言

降雨时空特征反映了区域水资源条件, 对农业生产、防汛抗旱等活动有指导意义^[1-2]。在气

候变化得到全球关注和研究的背景下^[3-7], 降雨时空特征也成为与气候变化有关的重要问题。

降雨间隔是降雨的一个时间特征。赵树旗等(2018)^[8]研究显示地表径流污染物浓度受降

收稿日期: 2021-12-04; 接受日期: 2023-05-10

作者简介: 郝丽珍(1977-), 女, 山西原平人, 硕士, 副教授, 研究方向为数据挖掘。E-mail: caffih@sina.com

* 通信作者: 刘国梁(LIU Guoliang), E-mail: glliu@sxu.edu.cn

引文格式: 郝丽珍, 刘国梁, 董刚, 等. 降雨日间隔累积分布指数关系[J]. 山西大学学报(自然科学版), 2024, 47(2): 435-440. DOI:10.13451/j.sxu.ns.2023098

雨间隔影响。曾向红等(2020)^[9]和李凯等(2022)^[10]指出海绵城市规划设计中需要考虑降雨间隔的影响。降雨间隔对植物生长也有显著影响,如Knapp等(2002)^[11]指出降雨间隔影响草地植物群落组成和初级净生产力;周双喜等(2010)^[12]研究表明降雨间隔和总降雨量都是影响草原大针茅幼苗生长的关键因素;何莹莹等(2021)^[13]研究表明降雨间隔对油蒿株高和冠幅有显著影响;王佳敏等(2021)^[14]研究显示,在有岩溶裂隙环境下,降雨间隔延长会抑制桉楠的光合、株高和地径的生长。由于降雨间隔对植物生长的影响,吴徐燕等(2011)^[15]和王利娜等(2018)^[16]还曾用降雨间隔作为评估干旱的指标。目前降雨间隔仅被作为指标来使用,尚未见对降雨间隔规律的研究报道。而从气象记录的降雨资料可以析出大量降雨间隔资料,由于缺乏对降雨间隔规律的认识,阻碍了对降雨间隔资料蕴含的气候信息和水资源信息的挖掘。

本文从山西气象信息中心,获得4个气象站的41年的逐日降雨资料,利用该资料,分季节探讨了“降雨日”(日降雨量 ≥ 1 mm)间隔累积分布,以促进挖掘降雨间隔资料蕴含的信息。

1 材料和方法

资料为山西省的4个气象站1981年1月1日—2021年12月31日的逐日降雨量资料。4个气象站的站名分别为太原(坐标:东经 $112^{\circ}33'$,北纬 $27^{\circ}47'$)、大同(坐标:东经 $112^{\circ}20'$,北纬 $40^{\circ}06'$)、运城(坐标:东经 $111^{\circ}01'$,北纬 $35^{\circ}02'$)和平鲁(坐标:东经 $112^{\circ}16'$,北纬 $39^{\circ}31'$)。资料来自山西省气象局。资料内容为:年、月、日和日降雨量。资料完整。

对上述降雨资料,分季节统计分析相邻“降雨日”间隔时,剔除跨季间隔数据。

2 分析与讨论

对“日降雨量” ≥ 1 mm的降雨记录,基本统计情况见表1。对41年平均降雨量,上述4站中,大同最小,为376 mm,运城最大,为514 mm,平鲁为413 mm,太原为437 mm。降雨量的四季分布,夏季最多,冬季最少。对41年累计降雨日 R_d ,太原累计有2 036天,大同有2 044天,

表1 降雨统计表

Table 1 The statistical table of precipitation

指标	太原	大同	运城	平鲁	
41年平均降雨量/mm	春季	66	60	98	63
	夏季	260	227	238	260
	秋季	100	83	162	84
	冬季	10	6	15	7
	全年	437	376	514	413
41年累计降雨日 R_d /天	春季	417	427	503	430
	夏季	988	1 037	812	1 097
	秋季	503	488	680	512
	冬季	128	92	173	122
	总计	2 036	2 044	2 168	2 161
N_0 /个	春季	376	386	462	389
	夏季	947	996	771	1 056
	秋季	502	487	680	511
	冬季	90	54	134	84

运城有2 168天,平鲁有2 161天。同样,降雨日的四季分布,夏季最多,冬季最少。表1也显示了每个站四季相邻“降雨日”间隔总个数 N_0 ,降雨量较大对应 N_0 较大。由于 N_0 的统计过程中剔除了跨季间隔数据,因此 N_0 比对应“41年累计降雨日” R_d 小一些。如平鲁夏季 R_d 为1 097天,而 N_0 为1 056个。

图1为“降雨日”间隔的概率分布,它是对每个站1981—2021年所有相邻降雨日间隔进行统计的结果。可以发现“间隔”越大,出现的概率越小。从图1也可以发现“间隔”主要在0~19 d范围内,每个站均有59%以上的“间隔”在0~4 d范围内,有90%以上的“间隔”在0~19 d范围内。

图2—图5分别为四个气象站四季“降雨日”间隔累积分布。明显存在以下关系:

$$N/N_0 = A \cdot \exp(-c \cdot t), \quad (1)$$

其中 N 是相邻“降雨日”间隔大于 t 的个数, A 和 c 是正的拟合常数, N_0 为统计的“间隔”总个数。因为90%以上的“间隔”在0~19 d范围内(见图1),所以只对 $t \leq 19$ d的资料进行分析。图2—图5也给出了公式(1)形式的拟合函数。 A 值的最小值为0.710,出现在秋季的运城;最大值为0.948,出现在冬季的大同。整体上 A 值无明显季节差异和空间差异,均值约为0.819。拟合的 c 值,夏季较大,范围在 0.205 d^{-1} 至 0.328 d^{-1} 之间;冬季较小,范围在 0.044 d^{-1} 至 0.057 d^{-1} 之间;春季和

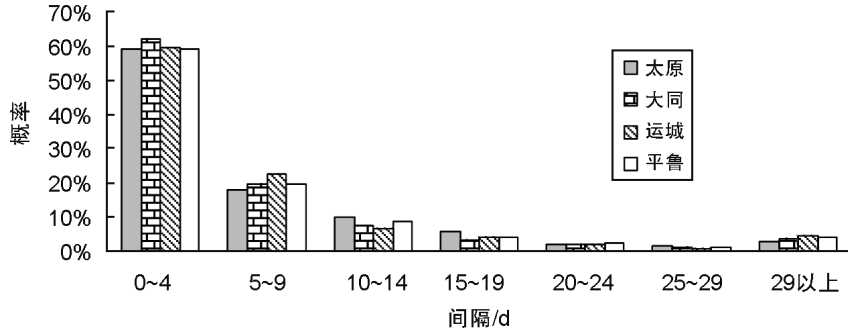


图1 相邻“降雨日”(日降雨量≥1 mm)间隔的概率分布

Fig. 1 Probability distribution of intervals between the adjacent Rain-days (with daily precipitation ≥ 1 mm)

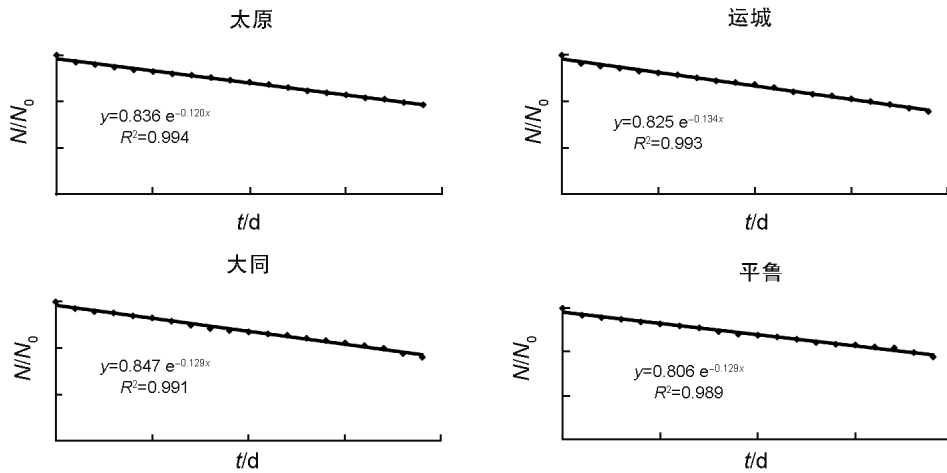


图2 半对数坐标下,太原、运城、大同和平鲁4个气象站,春季“降雨日”间隔大于 t 的个数 N 随 t 的变化
其中 N_0 为“总间隔个数”,其值见表1。图中也给出公式(1)形式的拟合函数

Fig. 2 Semi-logarithmic plot of N (the number of the intervals between the adjacent rain-days with length longer than t) versus t for spring at the 4 meteorological stations of Taiyuan, Yuncheng, Datong and Pinglu. N_0 was the total number of intervals with value shown in Table 1. The regression functions as Eq. (1) were also shown in the figure

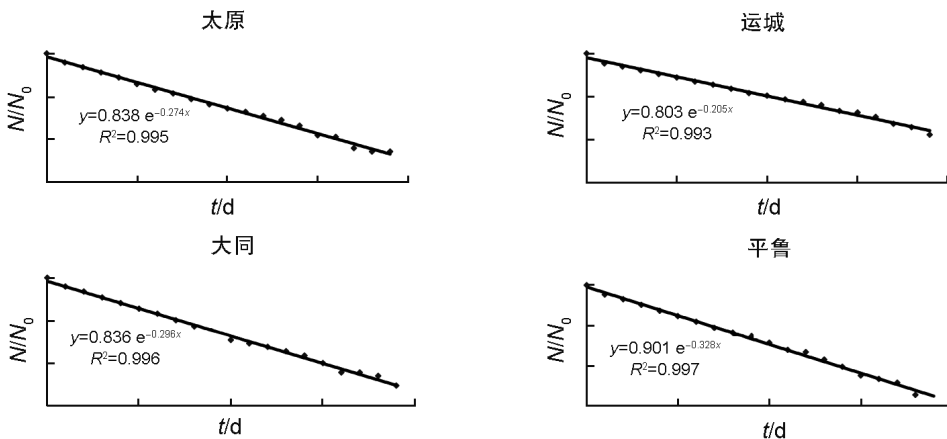


图3 半对数坐标下,太原、运城、大同和平鲁4个气象站,夏季“降雨日”间隔大于 t 的个数 N 随 t 的变化
其中 N_0 为“总间隔个数”,其值见表1。图中也给出公式(1)形式的拟合函数

Fig. 3 Semi-logarithmic plot of N (the number of the intervals between the adjacent rain-days with length longer than t) versus t for summer at the 4 meteorological stations of Taiyuan, Yuncheng, Datong and Pinglu. N_0 was the total number of intervals with value shown in Table 1. The regression functions as Eq. (1) were also shown in the figure

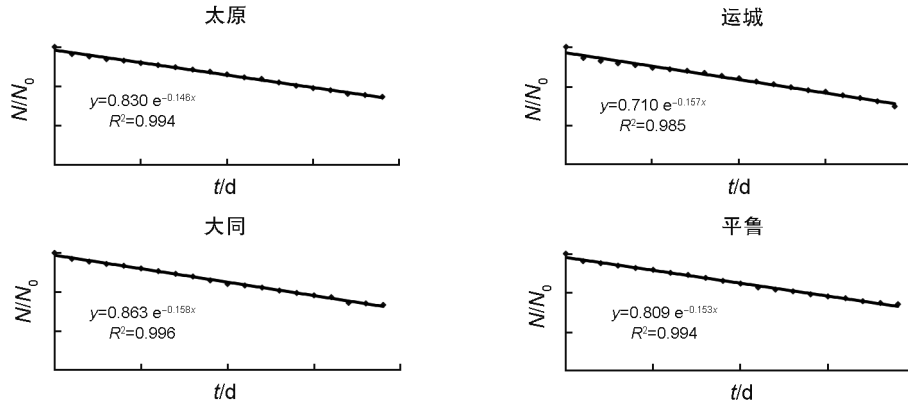


图4 半对数坐标下,太原、运城、大同和平鲁4个气象站,秋季“降雨日”间隔大于 t 的个数 N 随 t 的变化
其中 N_0 为“总间隔个数”,其值见表1。图中也给出公式(1)形式的拟合函数

Fig. 4 Semi-logarithmic plot of N (the number of the intervals between the adjacent rain-days with length longer than t) versus t for autumn at the 4 meteorological stations of Taiyuan, Yuncheng, Datong and Pinglu. N_0 was the total number of intervals with value shown in Table 1. The regression functions as Eq. (1) were also shown in the figure

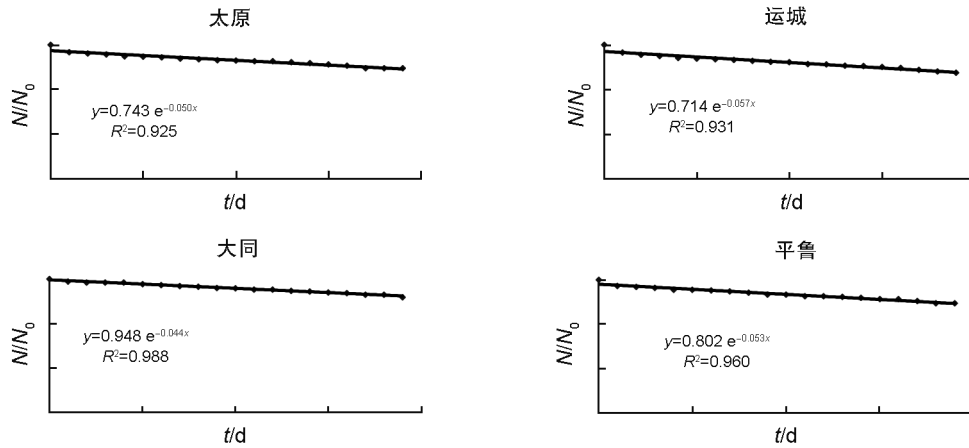


图5 半对数坐标下,太原、运城、大同和平鲁4个气象站,冬季“降雨日”间隔大于 t 的个数 N 随 t 的变化
其中 N_0 为“总间隔个数”,其值见表1。图中也给出公式(1)形式的拟合函数

Fig. 5 Semi-logarithmic plot of N (the number of the intervals between the adjacent rain-days with length longer than t) versus t for winter at the 4 meteorological stations of Taiyuan, Yuncheng, Datong and Pinglu. N_0 was the total number of intervals with value shown in Table 1. The regression functions as Eq. (1) were also shown in the figure

秋季接近,范围在 $0.118 d^{-1}$ 至 $0.158 d^{-1}$ 之间。

假设单一季节“降雨日”为平稳独立随机变量。根据Liu等^[17]和Liu^[18]对时间间隔分布的理论研究,基于该假设,可以推导出单一季节相邻“降雨日”间隔大于 t 的个数 N 满足公式(1),并有

$$c = -\ln(1 - P), \quad (2)$$

$$A = 1, \quad (3)$$

其中 \ln 是以 e 为底的自然对数, P 为当季“降雨日”出现概率,可用下式计算

$$P = R_d/M, \quad (4)$$

其中 R_d 为统计时段累计降雨日。对上述4站,

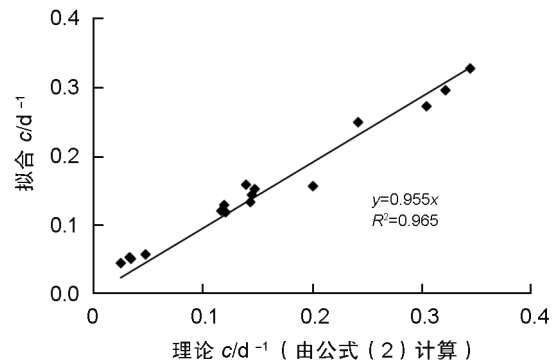


图6 理论 c 值(公式(2))与拟合 c 值的比较

Fig. 6 Comparison between the theoretical c value (Eq. (2)) and the fitting c value

R_d 值见表1, M 为统计时段总天数。对上述4站,拟合的 A 值在 0.710 至 0.948 之间,与理论 A 值接近。图6为用公式(2)计算的 c 值与拟合的 c 值(来自图2—5)的比较,二者也基本接近。

3 结论

通过分析山西省4个气象站的逐日降雨资料,发现各季“降雨日”(日降雨量 ≥ 1 mm)间隔很好地满足指数关系 $N/N_0 = A \cdot \exp(-c \cdot t)$, N 是相邻“降雨日”间隔大于 t 的个数, A 与 c 是正的拟合常数, N_0 是“间隔”总个数。假设单一季节“降雨日”为平稳独立随机变量,推导的“降雨日”间隔规律与上述关系不仅形式一致,而且对应参数也基本接近。因此尽管本文使用资料有限,但有理由相信该规律有普适性。

参考文献:

- [1] 刘开磊, 刘小虎, 王式成, 等. 淮河流域降雨时空变化研究[J]. 水文, 2023, **43**(2): 115–119. DOI: 10.19797/j.cnki.1000-0852.20210523.
LIU K L, LIU X H, WANG S C, *et al.* Analysis of Rainfall Spatio-Temporal Variation in the Huai River Basin [J]. *J China Hydrol*, 2023 **43**(2): 115–119. DOI: 10.19797/j.cnki.1000-0852.20210523.
- [2] 郑彦辰, 李建柱, 荣佑同, 等. 降雨时空分布量化及其在洪水过程分类中的应用[J]. 水利学报, 2022, **53**(5): 560–573. DOI: 10.13243/j.cnki.slxb.20210821.
ZHENG Y C, LI J Z, RONG Y T, *et al.* Quantification of Rainfall Spatial and Temporal Distribution Characteristics on the Flood Hydro-graph and Its Application in Flood Type Classification[J]. *J Hydraul Eng*, 2022, **53**(5): 560–573. DOI: 10.13243/j.cnki.slxb.20210821.
- [3] 王洁, 董刚, 张峰. 松嫩平原西部气候和土地利用变化对蒸散的影响[J]. 山西大学学报(自然科学版), 2015, **38**(2): 375–384. DOI: 10.13451/j.cnki.shanxi.univ(nat.sci.).2015.02.029.
WANG J, DONG G, ZHANG F. Effects of Climatic Change and Land Use/Cover Change on Evapotranspiration in the Western Songnen Plain of Northeast China[J]. *J Shanxi Univ Nat Sci Ed*, 2015, **38**(2): 375–384. DOI: 10.13451/j.cnki.shanxi.univ(nat.sci.).2015.02.029.
- [4] 徐北瑶, 王体健, 李树, 等. “双碳”目标对我国未来空气污染和气候变化的影响评估[J]. 科学通报, 2022, **67**(8): 784–794. DOI: 10.1360/TB-2021-1091.
XU B Y, WANG T J, LI S, *et al.* Assessment of the Impact of “Dual-carbon” Goal on Future Changes in Air Pollution and Climate in China[J]. *Chin Sci Bull*, 2022, **67**(8): 784–794. DOI: 10.1360/TB-2021-1091.
- [5] 高江波, 刘路路, 郭灵辉, 等. 气候变化和物候变动对东北黑土区农业生产的协同作用及未来粮食生产风险[J]. 地理学报, 2022, **77**(7): 1681–1700. DOI: 10.11821/dlxb202207008.
GAO J B, LIU L L, GUO L H, *et al.* Synergic Effects of Climate Change and Phenological Variation on Agricultural Production and Its Risk Pattern in Black Soil Region of Northeast China[J]. *Acta Geogr Sin*, 2022, **77**(7): 1681–1700. DOI: 10.11821/dlxb202207008.
- [6] HANSON M C, PETCH G M, OTTOSEN T B, *et al.* Climate Change Impact on Fungi in the Atmospheric Microbiome[J]. *Sci Total Environ*, 2022, **830**: 154491. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2022.154491.
- [7] 江洁, 周天军, 张文霞. 近60年来中国主要流域极端降水演变特征[J]. 大气科学, 2022, **46**(3): 707–724. DOI: 10.3878/j.issn.1006-9895.2111.21187.
JIANG J, ZHOU T J, ZHANG W X. Temporal and Spatial Variations of Extreme Precipitation in the Main River Basins of China in the Past 60 Years[J]. *Chin J Atmos Sci*, 2022, **46**(3): 707–724. DOI: 10.3878/j.issn.1006-9895.2111.21187.
- [8] 赵树旗, 卢兴超, 周玉文, 等. 不同降雨条件下非渗透地表径流 TOC、TP 输出规律和成因分析研究[J]. 环境污染与防治, 2018, **40**(5): 566–571. DOI: 10.15985/j.cnki.1001-3865.2018.05.015.
ZHAO S Q, LU X C, ZHOU Y W, *et al.* Study on the Output Rules and Causes of TOC, TP in Impervious Surface Runoff with Different Rainfall Conditions[J]. *Environ Pollut Control*, 2018, **40**(5): 566–571. DOI: 10.15985/j.cnki.1001-3865.2018.05.015.
- [9] 曾向红, 蒋元华, 杨清清, 等. 降雨事件间隔时间对海绵城市规划设计的影响[J]. 中国给水排水, 2020, **36**(21): 102–109. DOI: 10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2020.21.018.
ZENG X H, JIANG Y H, YANG Q Q, *et al.* Effect of Rainfall Inter-event Time Definition on Sponge City Planning and Design[J]. *China Water Wastewater*, 2020, **36**(21): 102–109. DOI: 10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2020.21.018.
- [10] 李凯, 王建龙, 林宏军, 等. 生物滞留设施排空时间影响因素研究[J]. 环境工程技术学报, 2022, **12**(1): 240–247. DOI: 10.12153/j.issn.1674-991X.20210156.
LI K, WANG J L, LIN H J, *et al.* Study on the Influencing Factors of Emptying Time of Bioretention Facilities [J]. *J Environ Eng Technol*, 2022, **12**(1): 240–247. DOI: 10.12153/j.issn.1674-991X.20210156.
- [11] KNAPP A K, FAY P A, BLAIR J M, *et al.* Rainfall Variability, Carbon Cycling, and Plant Species Diversity in

- a Mesic Grassland[J]. *Science*, 2002, **298**(5601): 2202–2205. DOI: 10.1126/science.1076347.
- [12] 周双喜, 吴冬秀, 张琳, 等. 降雨格局变化对内蒙古典型草原优势种大针茅幼苗的影响[J]. 植物生态学报, 2010, **34**(10): 1155–1164.
ZHOU S X, WU D X, ZHANG L, *et al.* Effects of Changing Precipitation Patterns on Seedlings of *Stipa grandis*, a Dominant Plant of Typical Grassland of Inner Mongolia, China[J]. *Chin J Plant Ecol*, 2010, **34**(10): 1155–1164.
- [13] 何莹莹, 于明含, 丁国栋, 等. 油蒿(*Artemisia ordosica*) 幼苗生长及生物量分配对降雨量和降雨间隔的响应[J]. 中国沙漠, 2021, **41**(5): 183–191. DOI: 10.7522/j.issn.1000-694X.2021.00061.
HE Y Y, YU M H, DING G D, *et al.* Responses of Seedling Growth and Biomass Allocation of *Artemisia ordosica* to Precipitation and Precipitation Interval[J]. *J Desert Res*, 2021, **41**(5): 183–191. DOI: 10.7522/j.issn.1000-694X.2021.00061.
- [14] 王佳敏, 成应杰, 陈金艺, 等. 模拟不同降雨时间格局下喀斯特垂直异质生境对桉楠幼苗光合和生长的影响[J]. 生态学报, 2021, **41**(18): 7348–7356. DOI: 10.5846/stxb202007131824.
WANG J M, CHENG Y J, CHEN J Y, *et al.* Effects of Simulated Karst Vertical Heterogeneous Habitat on Photosynthesis and Growth of *Phoebe zhennan* S.Lee Seedlings under Different Rainfall Temporal Pattern[J]. *Acta Ecol Sin*, 2021, **41**(18): 7348–7356. DOI: 10.5846/stxb202007131824.
- [15] 吴徐燕, 杨德保, 王式功, 等. 近 50 a 中国大陆无雨日的时空变化特征分析[J]. 干旱区地理, 2011, **34**(4): 596–603. DOI: 10.13826/j.cnki.cn65-1103/x.2011.04.001.
WU X Y, YANG D B, WANG S G, *et al.* Temporal and Spatial Characteristic of Rainless Days in Mainland China in Recent 50 Years[J]. *Arid Land Geogr*, 2011, **34**(4): 596–603. DOI: 10.13826/j.cnki.cn65-1103/x.2011.04.001.
- [16] 王利娜, 朱清科, 翁白莎, 等. 1961—2012 年黄土高原干旱时空分布特征[J]. 水利水电技术, 2018, **49**(2): 15–22. DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2018.02.003.
WANG L N, ZHU Q K, WENG B S, *et al.* Temporal and Spatial Distribution Characteristics of Drought in Loess Plateau from 1961 to 2012[J]. *Water Resour Hydropower Eng*, 2018, **49**(2): 15–22. DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2018.02.003.
- [17] LIU G L, HAO L Z, ZHANG F. The Time Interval Distribution of Sand-dust Storms in Theory: Testing with Observational Data for Yanchi, China[J]. *J Stat Mech*, 2012, **2012**(11): P11015. DOI: 10.1088/1742-5468/2012/11/p11015.
- [18] LIU G L. A New Physical Model for Earthquake Time Interval Distribution[J]. *Phys A Stat Mech Appl*, 2017, **465**: 62–65. DOI: 10.1016/j.physa.2016.08.006.