网络出版时间:2026-02-04 DOI:10.13207/j.jnwafu.2026.08.006

# 湿地松幼苗生长对岩溶裂隙下模拟降雨的响应

石顺柔,郑绍傑,陈雨,王琳,董琼
(西南林业大学 林学院,云南 昆明 650224)

[摘 要] 【目的】研究不同岩溶裂隙下湿地松幼苗生长状况对降雨间隔时长的响应,为石漠化地区湿地松幼苗生长提供一定理论依据。【方法】以2年生湿地松幼苗为研究对象,采用双因素区组试验,因素1为不同降雨间隔时长,即降雨间隔时长3 d($I_{3d}$,减少时长)、6 d($I_{6d}$,自然时长)和9 d($I_{9d}$,延长时长),因素2为不同岩溶小生境,即无石全土($S_0$)、少石多土($S_{1/4}$)和半石半土($S_{1/2}$),在试验结束时测量幼苗生长指标、生物量及营养元素含量。【结果】①湿地松幼苗生长量在同一降雨间隔时长下随岩溶裂隙的加深均呈先增加后减少的趋势,在$S_{1/4}$岩溶生境下达到最大,其中地径最大为12.01 cm,苗高最高为54.28 cm,针叶长最长为16.13 cm;在同一岩溶生境下,随降雨间隔时长的延长表现为逐渐下降趋势。②湿地松幼苗各器官生物量在$I_{3d}$和$I_{6d}$降雨间隔条件下随岩溶裂隙的加深表现出先上升后下降的规律,在$I_{9d}$下则均表现为逐渐下降趋势;湿地松幼苗茎、叶、地上生物量在同一岩溶生境下随降雨间隔时长的延长均表现为逐渐下降趋势(除$S_0$处理下的地径、$S_{1/4}$处理下的茎生物量外),根生物量、总生物量随降雨间隔时长的延长表现出先增加后减少的趋势。$I_{3d}$和$I_{6d}$下各器官生物量分配比均表现为叶>茎>根,而$I_{9d}$下表现为根>茎>叶;根冠比在$I_{9d}S_{1/2}$下最大,为0.61。③湿地松幼苗各器官矿质营养元素含量在$I_{3d}$和$I_{6d}$下随岩溶裂隙的加深呈先上升后下降的规律,在$I_{9d}$下则均表现为逐渐下降趋势,且各器官$K^+$、$Ca^{2+}$、$Na^+$、$Mg^{2+}$含量均表现为根>叶>茎,各器官矿质营养元素含量均表现为$Ca^{2+}>Mg^{2+}>K^+>Na^+$,而各器官$K^+$、$Ca^{2+}$、$Na^+$、$Mg^{2+}$在同一岩溶生境下随降雨间隔时长的延长呈逐渐下降趋势(除$S_0$处理下的$Ca^{2+}$外),各器官$K^+/Na^+$在同一岩溶生境下表现为逐渐上升趋势(除$S_{1/4}$生境中的根$K^+/Na^+$和$S_0$生境中的叶$K^+/Na^+$外),且叶$K^+/Na^+$在所有处理中最大(5.52)。④主成分分析得出累计方差贡献率为72.2%,能代表绝大多数信息。⑤湿地松幼苗生长及矿质营养元素含量之间均呈极显著正相关($P<0.01$)。⑥模糊隶属分析表明,湿地松幼苗生长状况在不同处理下表现为$I_{3d}S_{1/4}>I_{3d}S_0>I_{6d}S_{1/4}>I_{3d}S_{1/2}>I_{6d}S_0>I_{9d}S_0>I_{6d}S_{1/2}>I_{9d}S_{1/4}>I_{9d}S_{1/2}$。【结论】延长降雨间隔时长对湿地松幼苗生长有抑制作用,$I_{3d}$和$I_{6d}$下增加岩溶裂隙能在一定程度上促进湿地松幼苗的生长发育;$I_{3d}S_{1/4}$处理下湿地松幼苗生长最好,其次是$I_{3d}S_0$和$I_{6d}S_{1/4}$处理。

[关键词] 湿地松幼苗;岩溶生境;降雨间隔时长;生物量;矿质营养元素
[中图分类号] S791.246 [文献标志码] A [文章编号] 1671-9387(2026)08-0047-12

# Response of *Pinus elliottii* seedlings' growth to simulated rainfall in Karst habitats

SHI Shunrou, ZHENG Shaojie, CHEN Yu, WANG Lin, DONG Qiong
(*College of Forestry, Southwest Forestry University, Kunming, Yunnan* 650224, *China*)

**Abstract**: 【Objective】 This study aimed to investigate the response of *Pinus elliottii* seedling growth to rainfall interval duration under different Karst fissures, thereby providing a certain theoretical basis for the growth of *P. elliottii* seedlings in rocky desertification areas. 【Method】 A two-factor block experiment was conducted using 2-year-old *P. elliottii* seedlings. Factor 1 consisted of different rainfall intervals: a shortened inter-

[收稿日期] 2025-06-19 [修回日期] 2025-07-28
[基金项目] 云南省重点研发专项项目(202102AE090132)
[作者简介] 石顺柔(2001—),女,贵州湄潭人,在读硕士,主要从事植被恢复与保持研究。E-mail:18798171305@163.com
[通信作者] 董琼(1973—),男,湖北云梦人,教授,博士,硕士生导师,主要从事植被恢复和经济林栽培研究。E-mail:dqyeam@swfu.edu.cn

val of 3 days ($I_{3d}$), a natural interval of 6 days ($I_{6d}$), and an extended interval of 9 days ($I_{9d}$). Factor 2 comprised different Karst microhabitats: soil without stones ($S_0$), soil with a few stones ($S_{1/4}$), and half soil and half stones ($S_{1/2}$). At the end of the experiment, the growth indicators, biomass, and nutrient element contents of the seedlings were measured. 【Result】 ①The growth parameters of *P. elliottii* seedlings exhibited an initial increase followed by a decrease as the Karst fissures deepened under the same rainfall interval duration, reaching its maximum in the $S_{1/4}$ Karst habitat. The maximum ground diameter, seedling height, and needle length were 12.01 cm, 54.28 cm, and 16.13 cm, respectively. Under the same Karst habitat, the growth parameters showed a gradual decline with the extension of the rainfall interval duration. ②Under $I_{3d}$ and $I_{6d}$, the biomass of various organs of *P. elliottii* seedlings demonstrated an initial increase followed by a decrease with the deepening of Karst fissures, while a gradual decline was observed under $I_{9d}$. Under the same Karst habitat, stem, leaf, and aboveground biomass exhibited a gradual decline with the extension of the rainfall interval duration (except for basal diameter under $S_0$ treatment and stem biomass under $S_{1/4}$ treatment). In contrast, root biomass and total biomass showed an initial increase followed by a decrease. The biomass allocation ratio of various organs under $I_{3d}$ and $I_{6d}$ ranked leaf > stem > root, but shifted to root > stem > leaf under the $I_{9d}$. The root-to-shoot ratio was highest (0.61) under the $I_{9d}S_{1/2}$ treatment. ③Under $I_{3d}$ and $I_{6d}$, the mineral nutrient content in various organs of *P. elliottii* seedlings exhibited an initial increase followed by a decrease with the deepening of Karst fissures, while a gradual decline was observed under a $I_{9d}$. The content of $K^+$, $Ca^{2+}$, $Na^+$, and $Mg^{2+}$ in various organs ranked root > leaf > stem, with the order of overall mineral nutrient content being $Ca^{2+} > Mg^{2+} > K^+ > Na^+$. Under the same Karst habitat, the content of $K^+$, $Ca^{2+}$, $Na^+$, and $Mg^{2+}$ in various organs showed a gradual decline with the extension of the rainfall interval duration (except for $Ca^{2+}$ under $S_0$ treatment). The $K^+/Na^+$ ratio in all organs exhibited a gradual increase under the same Karst habitat (except for the root $K^+/Na^+$ in the $S_{1/4}$ habitat and leaf $K^+/Na^+$ in the $S_0$ habitat), with the maximum leaf $K^+/Na^+$ ratio of 5.52 observed across all treatments. ④Principal component analysis revealed a cumulative variance contribution rate of 72.2%, accounting for the majority of the information. ⑤The growth of *P. elliottii* seedlings and the content of mineral nutrients exhibited a highly significant positive correlation ($P<0.01$). ⑥Fuzzy membership analysis ranked the growth performance of *P. elliottii* seedlings under different treatments as follows: $I_{3d}S_{1/4} > I_{3d}S_0 > I_{6d}S_{1/4} > I_{3d}S_{1/2} > I_{6d}S_0 > I_{9d}S_0 > I_{6d}S_{1/2} > I_{9d}S_{1/4} > I_{9d}S_{1/2}$. 【Conclusion】 Prolonging the rainfall interval duration exerted an inhibitory effect on the growth of *P. elliottii* seedlings. Under $I_{3d}$ and $I_{6d}$ treatments, a moderate increase in Karst fissure depth promoted the growth and development of *P. elliottii* seedlings. Consequently, seedlings exhibited optimal growth under the $I_{3d}S_{1/4}$ treatment, followed by the $I_{3d}S_0$ and $I_{6d}S_{1/4}$ treatments.

**Key words**: *Pinus elliottii* seedings; Karst habitat; duration of rainfall interval; biomass; mineral nutrient element

喀斯特石漠化地区是生态和环境脆弱的主要地区,严重威胁到当地社会经济的可持续发展[1]。岩溶生境是指由岩溶作用(包括水的溶蚀、侵蚀以及沉积等地质作用)形成的特殊生态环境,是世界上主要的生态环境类型之一,约占地球陆地总面积的15%[2]。我国岩溶区域分布面积约346.3万$km^2$,占我国土地面积的35.93%,主要集中于广西、贵州和云南等西南地区[3]。这种生态环境中岩石裸露面积通常较大,土壤难以形成且易于流失,土层浅薄且分布不连续,岩溶水文地质结构随岩性和地形的变化而变化,这对植物的水分来源及其季节性变化产生了影响[4]。目前全球气候变化导致了降雨格局(降雨量及降雨间隔时长)正逐步发生改变,在我国西南岩溶地区总降雨量基本不变,而年雨日显著减小,即降雨间隔时间会延长而单次降雨量增大[5]。由于岩溶生境面积广阔,生态环境脆弱,对外界干扰较为敏感,其抗逆能力、稳定性和自我恢复能力均相对较低[6],同时降雨对西南岩溶地区的土壤造成了极大影响,进而影响了该地区植物的生存和生长发育[7]。

植物不同器官生物量积累及分配是体现植物对逆境环境长期适应的一个重要指标[8]。郭旭曼

等[9]研究发现，在岩溶地区由于土壤中水分和养分先天不足，植物通过增加根系生物量分配来提高对土壤资源的有效利用；郑绍傑等[10]研究发现，树番茄幼苗生物量分配表现为叶＞茎＞根，促进了树番茄幼苗对$CO_2$的吸收，使其快速生长。此外，土壤矿质营养元素（$K^+$、$Ca^{2+}$、$Na^+$、$Mg^{2+}$）是供给植物有效养分最基本的途径，可被植物直接吸收利用[11]。在植物生长发育过程中，$K^+$具有调控离子平衡、调节渗透和细胞膨压等生理功能；$Ca^{2+}$主要维持膜结构的稳定性；$Na^+$可部分替代$K^+$的作用，提高细胞液的渗透势。然而，$K^+/Na^+$是植物耐盐性的关键因素，$Na^+$会与$K^+$竞争，从而结合根系细胞位点及转运蛋白，使其在植物体内易位、沉积和分区，最终影响植物的生长发育[12]。$Mg^{2+}$可维持叶绿体结构。这些矿质营养元素是植物生长不可或缺的元素，这些元素的变化会对植物生物量产生较大影响[13]。例如，郭文等[14]报道，土壤含水量会影响土壤矿质营养元素的活化和迁移，从而影响杉木的生长发育；李泰等[15]研究发现，土壤中矿质营养元素含量会影响苹果果树生长，进而影响其果实品质；陈翠萍等[16]研究表明，自然生长在岩溶地区的顶坛花椒由于土壤提供的水分和养分不足，出现了植株衰退现象。

湿地松（*Pinus elliottii*）原产于美国东南部，我国于20世纪30年代开始引种。由于湿地松适应性强、生长快、用途广泛等，目前已成为我国南方主要的造林树种之一[17-18]。湿地松是我国引进的速生多用途树种，是林业生产的主要造林树种，是国家森林资源的重要组成部分[19]。目前国内外学者对湿地松的研究主要在水淹-干旱胁迫[20]、施肥[21]、土壤水分[22]、光照[23]、光合特性[24]、油脂素产量[25]、重复淹水对湿地松幼苗营养元素积累的影响[26]等方面。在岩溶地区的植被恢复早期，湿地松的生长最快，根系的活动能力最强，还具有改良土壤的作用[27]。湿地松作为云南省的外来树种，造林后其树高生长在早期呈现逐年增加的趋势，随后连年生长量急剧下降，最终趋于平稳，且湿地松早期生长比云南松好，说明湿地松适宜生长在云南省，可以对其进行大规模栽培利用[28]。然而，随着云南省降雨格局的改变，湿地松如何适应这一环境变化暂不明确。为此，本研究通过模拟不同岩溶生境及降雨间隔时长，利用盆栽试验，对2年生湿地松幼苗的生长、生物量及矿质营养元素进行测定分析，揭示湿地松幼苗在不同岩溶生境下应对降雨变化的生长规律，旨在为湿地松在岩溶地区更好地栽培利用和资源管理提供理论依据。

## 1　材料与方法

### 1.1　试验地概况

试验地位于云南省昆明市西南林业大学树木园温室大棚（25°03′ N，102°46′ E）。该试验地属于亚热带高原季风性气候，年平均温度为16.5 ℃，年降雨量为1 035 mm，相对湿度为67%，平均海拔高度为1 954 m，气候温暖，霜期短。

### 1.2　试验材料

研究对象为2年生湿地松实生苗。供试土壤为红壤土，岩石为喀斯特石灰石，二者均取自石漠化岩溶地区云南省建水县。红壤土理化性质：pH值5.05，土壤体积质量1.08 g/cm$^3$，土壤有机质、全碳、全氮和总磷含量分别为3.34，31.24，0.68和0.45 g/kg，钾、钙、钠和镁含量分别为0.84，1.02，0.43和0.31 g/kg。

### 1.3　试验设计

本研究采用双因素随机区组试验，共设置岩溶生境和降雨间隔时长2个因素。根据西南地区云南省年均连续无有效降水日为6 d左右[29]，将降雨间隔时长分别设置为减少降雨间隔时长3 d（$I_{3d}$）、自然降雨间隔时长6 d（$I_{6d}$）和延长降雨间隔时长9 d（$I_{9d}$）。根据预试验结果设置不同岩溶小生境，即无石全土（$S_0$）、少石多土（$S_{1/4}$）和半石半土（$S_{1/2}$），容器保证各生境总体积相同（上口径30 cm，高20 cm），其中$S_0$生境为全土，$S_{1/4}$生境上3/4设置土壤层、下1/4设置岩溶裂隙层，$S_{1/2}$生境上1/2为土壤层、下1/2为岩溶裂隙层。根据中国昆明市6－12月月平均降雨量123.58 mm[30]，以自然降雨量、降雨分配为基准，计算每次灌水量，用量杯一次性灌入盆栽中，3种降雨间隔总降雨量保持一致，从而实现对总降雨量和降雨分配的模拟（表1）。试验共9个处理，每个处理重复3次，每个重复10株幼苗，共270株湿地松幼苗，幼苗生长情况基本一致，摆放苗顺序按试验处理进行，每个处理间相距60 cm，每个重复间相距40 cm，每盆幼苗相距15 cm，盆底带有托盘，防止水分渗漏。试验于2023年4月将湿地松幼苗移栽到容器内，每盆1株，4－5月进行炼苗处理，6－9月开展试验研究。

表1 不同降雨时长的降雨分配

Table 1 Rainfall distribution under different durations of rainfall intervals

| 处理 Treatment | 降雨持续时间/d Rainfall interval | 单次灌水量/mL Irrigation volume per event | 月灌水频次 Monthly irrigation frequency |
|---|---|---|---|
| $I_{3d}$ | 3 | 873.09 | 10 |
| $I_{6d}$ | 6 | 1 746.19 | 5 |
| $I_{9d}$ | 9 | 2 910.31 | 3 |

### 1.4 测定指标及方法

试验开始处理前,用游标卡尺测定湿地松幼苗地径(mm),用直尺测定苗高(cm)和针叶长(cm);试验结束时(2023年9月22日),测定各处理湿地松幼苗的苗高和地径,同时对每个处理随机选取6株幼苗进行破坏性取样,将苗木整株挖出,用清水冲洗干净后再用吸水纸擦净表面水分(避免破坏根系),带回实验室进行处理。将湿地松幼苗根、茎、叶分离并标记,放入对应的已编号标记的信封袋中,然后放入烘箱在105 ℃下杀青30 min后,置于80 ℃下烘干至恒质量,称取各器官质量,获得湿地松幼苗根、茎、叶生物量(g),并计算地上生物量、总生物量及根、茎、叶生物量占比和根冠比。将称质量后的植株样品粉碎、过1.0 mm筛后,准确称取0.200 g样品,采用$H_2SO_4$-$H_2O_2$消煮、等离子色谱法测定各器官$K^+$、$Ca^{2+}$、$Na^+$和$Mg^{2+}$含量。

### 1.5 数据统计

通过Excel 2010整理和计算数据,借助SPSS 25.0进行Person相关性分析、Duncan差异性分析、主成分分析和模糊隶属函数综合评价,利用Origin 2021绘图。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同岩溶生境及降雨间隔时长下湿地松幼苗的生长量及生物量

2.1.1 生长量 不同岩溶生境及降雨间隔时长下湿地松幼苗的生长量见表2。

表2 不同岩溶生境及降雨间隔时长下湿地松幼苗的生长量

Table 2 Growth parameters of *Pinus elliottii* seedlings under different Karst habitats and rainfall intervals

| 降雨间隔时长 Rainfall interval | 岩溶生境 Karst habitat | 地径/mm Stem diameter | 苗高/cm Seedling height | 针叶长/cm Needle length |
|---|---|---|---|---|
| $I_{3d}$ | $S_0$ | 11.41±1.102 Aa | 52.42±9.314 Aa | 15.53±1.120 Aa |
| | $S_{1/4}$ | 12.01±0.670 Aa | 54.28±2.429 Aa | 16.13±2.303 Aa |
| | $S_{1/2}$ | 9.97±0.897 Ba | 51.63±4.286 Aa | 13.02±1.569 Ba |
| $I_{6d}$ | $S_0$ | 9.22±1.059 Bb | 48.62±1.893 Aab | 14.45±1.349 Aab |
| | $S_{1/4}$ | 10.85±1.101 Ab | 50.22±7.835 Aab | 15.22±1.652 Aa |
| | $S_{1/2}$ | 8.97±0.711 Ba | 45.42±2.683 Ab | 11.93±1.623 Bab |
| $I_{9d}$ | $S_0$ | 9.46±0.960 Ab | 44.27±1.211 Ab | 13.30±1.368 Ab |
| | $S_{1/4}$ | 9.62±0.521 Ac | 46.35±3.492 Ab | 13.77±2.592 Aa |
| | $S_{1/2}$ | 7.82±1.007 Bb | 39.63±3.092 Bc | 10.27±1.468 Bb |
| *F* | I | 26.24** | 17.20** | 9.10** |
| | S | 19.86** | 4.44* | 18.53** |
| | I×S | 1.37ns | 0.35ns | 0.05ns |

注:表中数据为"平均值±标准差"。同列数据后标不同小写字母表示相同岩溶生境、不同降雨间隔时长间差异显著($P<0.05$),不同大写字母表示相同降雨间隔时长、不同岩溶生境间差异显著($P<0.05$)。I代表降雨间隔时长,S代表岩溶生境,I×S代表降雨间隔时长与岩溶生境的交互作用。ns表示$P>0.05$,*表示$P<0.05$,**表示$P<0.01$。下同。

Note: Data in the table are presented as "mean ± standard deviation". Different lowercase letters in the same column indicate significant differences among treatments with different rainfall intervals in the same Karst habitat ($P<0.05$), while different uppercase letters indicate significant differences among Karst habitats with the same rainfall interval ($P<0.05$). I represents rainfall interval, S represents Karst habitat, and I×S represents the interaction between rainfall interval and Karst habitat. ns indicates $P>0.05$, * indicates $P<0.05$, and ** indicates $P<0.01$. The same below.

由表2可知,湿地松幼苗的地径、苗高和针叶长在不同岩溶生境和降雨间隔时长下均具有显著性差异($P<0.05$),而在两者的交互作用下无显著性差异($P>0.05$)。在同一降雨间隔时长下,湿地松

幼苗生长量随着岩溶裂隙的加深表现出先增加后减少的变化规律，在$S_{1/4}$岩溶生境下达到最大，其中在$I_{3d}S_{1/4}$处理下最好，其地径、苗高和针叶长分别为12.01 mm、54.28 cm和16.13 cm，延长降雨间隔时长（$I_{9d}$）对湿地松幼苗的生长具有一定的抑制作用。在同一岩溶生境下，除$S_0$处理下的地径外，湿地松幼苗的生长量随着降雨间隔时长的增加表现出逐渐减少的变化规律，加大岩溶裂隙（$S_{1/2}$）会抑制湿地松幼苗的生长。

2.1.2　*生物量及其分配*　由表3可知，湿地松幼苗根生物量、总生物量在不同岩溶生境、降雨间隔时长及两者的交互作用下均具有极显著性差异（$P<0.01$）；茎生物量、叶生物量及地上生物量在不同岩溶生境、降雨间隔时长下具有极显著差异，而在两者的交互作用下无显著差异（$P>0.05$）。与$S_{1/4}$岩溶生境处理相比，在$I_{3d}$下$S_{1/2}$岩溶生境处理湿地松幼苗的根、茎和叶生物量分别降低了21.89%，16.72%和17.89%；在$I_{6d}$下分别较$S_{1/4}$岩溶生境处理降低23.87%，13.64%和13.57%，而在$I_{9d}$下，其幼苗根、茎和叶生物量最小，分别较$S_{1/4}$处理降低了16.63%，19.66%和22.37%。在$I_{3d}$和$I_{6d}$下，除$I_{6d}$下的湿地松幼苗叶生物量外，湿地松幼苗各器官生物量、地上生物量及总生物量随岩溶裂隙的加深均呈先上升后下降趋势，并均在$S_{1/2}$处理下最低；在$I_{9d}$下，各器官生物量及总生物量随岩溶裂隙的加深呈现出逐渐下降的趋势，说明湿地松幼苗各器官生物量积累受岩溶裂隙的抑制。在相同岩溶生境下，根生物量、总生物量随降雨间隔时长的延长表现出先增加后减少的趋势；其余生物量随降雨间隔时长的延长表现出逐渐下降趋势，说明延长降雨间隔时长抑制了湿地松幼苗各器官生物量的积累，而缩短降雨间隔时长则促进了湿地松幼苗的生长。

**表3　不同岩溶生境及降雨间隔时长下湿地松幼苗的生物量**

Table 3　Biomass of *Pinus elliottii* seedlings under different Karst habitats and rainfall intervals　　g/株

| 降雨间隔时长 Rainfall interval | 岩溶生境 Karst habitat | 根生物量 Root biomass | 茎生物量 Stem biomass | 叶生物量 Leaf biomass | 总生物量 Total biomass | 地上生物量 Above-ground biomass |
|---|---|---|---|---|---|---|
| $I_{3d}$ | $S_0$ | 11.29±0.679 Ab | 14.01±2.048 Aa | 16.25±1.390 Aa | 41.56±3.509 Aa | 30.26±2.952 Aa |
| | $S_{1/4}$ | 12.15±0.746 Aa | 14.29±1.004 Aa | 16.56±1.610 Aa | 43.00±1.879 Aa | 30.84±1.750 Aa |
| | $S_{1/2}$ | 9.49±1.237 Ba | 11.89±0.975 Ba | 13.59±1.293 Ba | 34.98±1.788 Ba | 25.49±1.236 Ba |
| $I_{6d}$ | $S_0$ | 12.65±1.212 Aa | 13.78±1.838 Aa | 15.73±1.278 Aa | 42.16±1.619 Aa | 29.51±1.126 Aa |
| | $S_{1/4}$ | 12.81±0.933 Aa | 14.47±2.066 Aa | 15.44±2.084 Aa | 42.71±2.571 Aa | 29.90±3.035 Aa |
| | $S_{1/2}$ | 9.75±0.756 Ba | 12.49±1.499 Aa | 13.34±0.788 Ba | 35.59±2.348 Ba | 25.84±1.907 Ba |
| $I_{9d}$ | $S_0$ | 10.91±1.201 Ab | 9.99±1.234 Ab | 8.45±1.190 Ab | 29.36±2.982 Ab | 18.44±2.232 Ab |
| | $S_{1/4}$ | 8.23±1.138 Bb | 7.63±1.164 Bb | 6.93±1.294 Bb | 22.78±1.491 Bb | 14.55±1.656 Bb |
| | $S_{1/2}$ | 6.92±0.593 Cb | 6.13±1.254 Bb | 5.38±0.603 Cb | 18.43±1.481 Cb | 11.51±1.087 Cb |
| *F* | I | 47.61** | 81.85** | 226.46** | 311.22** | 283.57** |
| | S | 44.84** | 13.05** | 20.66** | 62.49** | 33.09** |
| | I×S | 5.84** | 2.05ns | 0.83ns | 5.59** | 2.60ns |

由表4可知，湿地松幼苗各器官生物量占比及根冠比在同一降雨间隔时长下均具有极显著差异（除茎生物量占比外）（$P<0.01$）；而在同一岩溶生境及两者的交互作用下无显著差异。在$S_0$岩溶生境处理下，湿地松幼苗根生物量占比随着降雨间隔时间的延长表现出逐渐上升的显著变化规律，在$S_{1/4}$和$S_{1/2}$生境处理下表现为逐渐上升的变化规律，且在$I_{9d}$下$S_{1/2}$岩溶生境中的根生物量占比最高（37.61%），说明在该处理下湿地松幼苗将更多的养分分配给根器官。随着降雨间隔时长的延长，叶生物量占比表现出逐渐下降的变化规律，并以$I_{3d}S_{1/2}$处理最高，达到0.39。在$S_0$岩溶生境处理下，茎生物量占比随着降雨间隔时间的延长表现出先减少后增加的变化规律，在$S_{1/4}$和$S_{1/2}$生境处理下表现为先增加后减少的变化规律，并以$I_{6d}S_{1/2}$处理最高，达到0.35。在不同岩溶生境下，根冠比随降雨间隔时长的延长而逐渐增大，但在$I_{3d}$和$I_{6d}$下无显著差异。各器官生物量占比在$I_{3d}$和$I_{6d}$下均表现为叶>茎>根，在$I_{9d}$下表现为根>茎>叶。说明湿地松幼苗为了自身的正常生长，在延长降雨间隔时长时将更多的生物量分配给根，体现了该生境下湿地松幼苗的生长策略。综上所述，增大岩溶裂缝和延长降雨间隔时长均会抑制湿地松幼苗的生长。

**表4 不同岩溶生境及降雨间隔时长对湿地松幼苗生物量分配的影响**

Table 4 Effects of different Karst habitats and rainfall intervals on biomass allocation of *Pinus elliottii* seedlings

| 降雨间隔时长 Rainfall interval | 岩溶生境 Karst habitat | 根生物量占比 Root biomiss proportion | 茎生物量占比 Stem biomiss proportion | 叶生物量占比 Leaf biomiss proportion | 根冠比 Root/shoot ratio |
|---|---|---|---|---|---|
| $I_{3d}$ | $S_0$ | 0.27±0.012 Ac | 0.34±0.029 Aa | 0.39±0.022 Aa | 0.38±0.023 Ab |
| | $S_{1/4}$ | 0.28±0.017 Ab | 0.33±0.020 Aa | 0.39±0.028 Aa | 0.40±0.033 Ab |
| | $S_{1/2}$ | 0.27±0.026 Ab | 0.34±0.034 Aa | 0.39±0.023 Ab | 0.37±0.050 Ab |
| $I_{6d}$ | $S_0$ | 0.30±0.022 Ab | 0.33±0.039 Aa | 0.37±0.036 Aa | 0.43±0.044 Ab |
| | $S_{1/4}$ | 0.30±0.034 Ab | 0.34±0.040 Aa | 0.36±0.031 Aa | 0.43±0.070 Ab |
| | $S_{1/2}$ | 0.27±0.016 Ab | 0.35±0.023 Aa | 0.38±0.023 Aa | 0.38±0.030 Ab |
| $I_{9d}$ | $S_0$ | 0.37±0.026 Aa | 0.34±0.021 Aa | 0.29±0.022 Ab | 0.60±0.064 Aa |
| | $S_{1/4}$ | 0.36±0.049 Aa | 0.34±0.050 Aa | 0.30±0.045 Ab | 0.58±0.123 Aa |
| | $S_{1/2}$ | 0.38±0.022 Aa | 0.33±0.048 Aa | 0.29±0.036 Ab | 0.61±0.055 Aa |
| *F* | I | $62.94^{**}$ | $0.03^{ns}$ | $47.96^{**}$ | $61.06^{**}$ |
| | S | $0.53^{ns}$ | $0.17^{ns}$ | $0.04^{ns}$ | $0.37^{ns}$ |
| | I×S | $1.07^{ns}$ | $0.35^{ns}$ | $0.44^{ns}$ | $0.86^{ns}$ |

## 2.2 不同岩溶生境及降雨间隔时长下湿地松幼苗的矿质营养元素含量

表5显示,在不同岩溶生境及降雨间隔时长下,湿地松幼苗不同器官$K^+$、$Ca^{2+}$、$Na^+$和$Mg^{2+}$含量(除在不同岩溶生境处理下根$Na^+$含量及叶$Mg^{2+}$含量外)具有极显著差异($P<0.01$)。在$I_{3d}$和$I_{6d}$下,湿地松幼苗各器官$K^+$、$Ca^{2+}$、$Na^+$、$Mg^{2+}$含量随岩溶裂隙的加深呈现出先增加后下降的变化规律,而在$I_{9d}$下则呈逐渐下降趋势;在同一岩溶裂隙下,湿地松幼苗各器官$K^+$、$Na^+$、$Mg^{2+}$含量随降雨间隔时长的增加均呈逐渐下降趋势。

**表5 不同岩溶生境及降雨间隔时长对湿地松幼苗矿质元素含量的影响**

Table 5 Effects of different Karst habitats and rainfall intervals on mineral elements in *Pinus elliottii* seedlings

| 降雨间隔时长 Rainfall interval | 岩溶生境 Karst habitat | 根 Root | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | 钾含量/(mg·g$^{-1}$) $K^+$ content | 钙含量/(mg·g$^{-1}$) $Ca^{2+}$ content | 钠含量/(mg·g$^{-1}$) $Na^+$ content | 镁含量/(mg·g$^{-1}$) $Mg^{2+}$ content | $K^+/Na^+$ |
| $I_{3d}$ | $S_0$ | 0.34±0.040 Aa | 0.68±0.035 Ba | 0.09±0.010 Aa | 0.37±0.036 Aa | 3.80±0.438 Aa |
| | $S_{1/4}$ | 0.35±0.033 Aa | 0.81±0.066 Aa | 0.09±0.014 Aa | 0.37±0.029 Aa | 3.80±0.656 Aa |
| | $S_{1/2}$ | 0.29±0.035 Ba | 0.62±0.036 Ca | 0.08±0.012 Aa | 0.34±0.036 Aa | 3.79±1.195 Aa |
| $I_{6d}$ | $S_0$ | 0.27±0.035 Ab | 0.51±0.023 Bb | 0.06±0.010 Ab | 0.29±0.046 Ab | 4.43±0.810 Aa |
| | $S_{1/4}$ | 0.28±0.023 Ab | 0.69±0.047 Ab | 0.06±0.018 Ab | 0.31±0.024 Ab | 4.70±1.037 Aa |
| | $S_{1/2}$ | 0.21±0.022 Bb | 0.51±0.046 Bb | 0.06±0.014 Ab | 0.26±0.038 Ab | 3.84±0.751 Aa |
| $I_{9d}$ | $S_0$ | 0.25±0.040 Ab | 0.54±0.042 Ab | 0.05±0.011 Ab | 0.25±0.048 Ab | 4.99±1.450 Aa |
| | $S_{1/4}$ | 0.17±0.021 Bc | 0.40±0.051 Bc | 0.04±0.011 ABc | 0.24±0.048 Ac | 4.09±0.984 Aa |
| | $S_{1/2}$ | 0.16±0.013 Bc | 0.37±0.041 Bc | 0.04±0.010 Bc | 0.18±0.022 Bc | 4.91±1.155 Aa |
| *F* | I | $82.00^{**}$ | $161.51^{**}$ | $56.92^{**}$ | $60.96^{**}$ | $3.53^{*}$ |
| | S | $20.52^{**}$ | $43.05^{**}$ | $3.81^{*}$ | $8.10^{**}$ | $0.30^{ns}$ |
| | I×S | $5.20^{**}$ | $21.57^{**}$ | $0.83^{ns}$ | $0.76^{ns}$ | $1.22^{ns}$ |
| 降雨间隔时长 Rainfall interval | 岩溶生境 Karst habitat | 茎 Stem | | | | |
| | | 钾含量/(mg·g$^{-1}$) $K^+$ content | 钙含量/(mg·g$^{-1}$) $Ca^{2+}$ content | 钠含量/(mg·g$^{-1}$) $Na^+$ content | 镁含量/(mg·g$^{-1}$) $Mg^{2+}$ content | $K^+/Na^+$ |
| $I_{3d}$ | $S_0$ | 0.23±0.029 ABa | 0.51±0.053 Ba | 0.07±0.016 Aa | 0.31±0.041 Aa | 3.24±0.849 Aa |
| | $S_{1/4}$ | 0.26±0.038 Aa | 0.74±0.074 Aa | 0.08±0.013 Aa | 0.34±0.044 Aa | 3.30±1.071 Aa |
| | $S_{1/2}$ | 0.19±0.029 Ba | 0.42±0.089 Ba | 0.07±0.018 Aa | 0.29±0.030 Aa | 3.07±0.997 Ab |
| $I_{6d}$ | $S_0$ | 0.21±0.019 Aab | 0.38±0.043 Bb | 0.05±0.007 ABb | 0.22±0.051 Ab | 3.83±0.519 Aa |
| | $S_{1/4}$ | 0.21±0.053 Aa | 0.53±0.057 Ab | 0.06±0.015 Ab | 0.24±0.037 Ab | 3.66±1.516 Aa |
| | $S_{1/2}$ | 0.17±0.042 Aa | 0.32±0.056 Bb | 0.04±0.010 Bb | 0.16±0.028 Bb | 4.18±1.080 Aab |
| $I_{9d}$ | $S_0$ | 0.18±0.031 Ab | 0.42±0.064 Ab | 0.05±0.013 Ab | 0.19±0.018 Ab | 3.81±1.041 Aa |
| | $S_{1/4}$ | 0.15±0.019 Bb | 0.30±0.034 Bc | 0.03±0.008 Bc | 0.16±0.023 Ac | 5.06±1.752 Aa |
| | $S_{1/2}$ | 0.13±0.022 Bb | 0.19±0.047 Cc | 0.03±0.006 Bb | 0.16±0.052 Ab | 4.84±1.307 Aa |

表 5（续）　Table 5(continued)

| 降雨间隔时长 Rainfall interval | 岩溶生境 Karst habitat | 茎 Stem | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | 钾含量/(mg·g$^{-1}$) $K^+$ content | 钙含量/(mg·g$^{-1}$) $Ca^{2+}$ content | 钠含量/(mg·g$^{-1}$) $Na^+$ content | 镁含量/(mg·g$^{-1}$) $Mg^{2+}$ content | $K^+/Na^+$ |
| *F* | I | 19.31** | 81.69** | 37.85** | 69.23** | 6.09** |
| | S | 8.71** | 57.32** | 6.19** | 6.77** | 0.66ns |
| | I×S | 1.64ns | 15.14** | 2.36ns | 1.76ns | 0.82ns |
| 降雨间隔时长 Rainfall interval | 岩溶生境 Karst habitat | 叶 Leaf | | | | |
| | | 钾含量/(mg·g$^{-1}$) $K^+$ content | 钙含量/(mg·g$^{-1}$) $Ca^{2+}$ content | 钠含量/(mg·g$^{-1}$) $Na^+$ content | 镁含量/(mg·g$^{-1}$) $Mg^{2+}$ content | $K^+/Na^+$ |
| $I_{3d}$ | $S_0$ | 0.25±0.056 ABa | 0.53±0.075 Ba | 0.07±0.008 Ba | 0.34±0.068 Aa | 3.34±0.649 Aa |
| | $S_{1/4}$ | 0.28±0.056 Aa | 0.75±0.099 Aa | 0.09±0.006 Aa | 0.35±0.060 Aa | 3.35±0.766 Aa |
| | $S_{1/2}$ | 0.21±0.023 Ba | 0.48±0.071 Ba | 0.07±0.009 Ba | 0.31±0.055 Aa | 3.03±0.298 Ab |
| $I_{6d}$ | $S_0$ | 0.23±0.031 ABa | 0.44±0.044 Bb | 0.06±0.012 Ab | 0.25±0.072 ABb | 4.09±1.458 Aa |
| | $S_{1/4}$ | 0.26±0.034 Aa | 0.61±0.035 Ab | 0.07±0.009 Ab | 0.29±0.027 Ab | 3.82±0.668 Aa |
| | $S_{1/2}$ | 0.19±0.042 Bab | 0.39±0.109 Ba | 0.06±0.010 Ab | 0.22±0.035 Bb | 3.51±0.797 Ab |
| $I_{9d}$ | $S_0$ | 0.20±0.029 Aa | 0.47±0.058 Aab | 0.06±0.016 Ab | 0.22±0.032 Ab | 3.92±1.389 Aa |
| | $S_{1/4}$ | 0.16±0.035 Bb | 0.34±0.044 Bc | 0.04±0.005 Ac | 0.18±0.032 Bc | 4.49±1.355 Aa |
| | $S_{1/2}$ | 0.15±0.025 Bb | 0.23±0.067 Cb | 0.03±0.011 Bc | 0.16±0.036 Bb | 5.52±1.883 Aa |
| *F* | I | 18.11** | 50.87** | 57.36** | 39.24** | 6.91** |
| | S | 8.03** | 35.12** | 7.03** | 4.54* | 0.19ns |
| | I×S | 2.17ns | 11.06** | 4.62** | 1.37ns | 1.72ns |

由表 5 还可以看出，湿地松幼苗茎、叶 $K^+/Na^+$ 在不同降雨间隔时长下具有极显著差异（$P<0.01$），根 $K^+/Na^+$ 在不同降雨间隔时长下具有显著差异（$P<0.05$）。$S_{1/4}$ 岩溶生境处理下根 $K^+/Na^+$ 和 $S_0$ 岩溶生境处理下叶 $K^+/Na^+$ 随着降雨间隔时长的延长表现为先增加后下降的变化趋势；$S_0$ 岩溶生境处理下根、茎 $K^+/Na^+$，$S_{1/4}$ 岩溶生境处理下茎、叶 $K^+/Na^+$ 以及 $S_{1/2}$ 岩溶处理下根、茎、叶的 $K^+/Na^+$，均随着降雨间隔时长的延长而逐渐增加。在 $I_{3d}$ 下，湿地松幼苗各器官 $K^+/Na^+$ 值大小表现为根＞叶＞茎，且茎 $K^+/Na^+$ 在 $S_0$ 生境处理中最低（3.24）。在 $I_{6d}$ 下，根 $K^+/Na^+$ 随着岩溶裂隙的加深呈先增加后减少趋势，在 $S_{1/4}$ 处理下达最高（4.7）；茎 $K^+/Na^+$ 随着岩溶裂隙的加深呈先减少后增加趋势；叶 $K^+/Na^+$ 随着岩溶裂隙的加深表现为逐渐下降趋势。在 $I_{9d}$ 下，根 $K^+/Na^+$ 随着岩溶裂隙的加深呈先减少后增加趋势；茎 $K^+/Na^+$ 随着岩溶裂隙的加深呈先增加后减少趋势，在 $S_{1/4}$ 岩溶生境下最大（5.06）；叶 $K^+/Na^+$ 随着岩溶裂隙的加深呈逐渐增加趋势，且叶 $K^+/Na^+$ 在所有处理中最大达 5.52。

### 2.3　湿地松幼苗生长及矿质营养元素含量的相关性分析

由图 1 可知，湿地松幼苗各生长指标之间均呈极显著正相关（$P<0.01$）。湿地松幼苗叶 $Ca^{2+}$ 含量与茎 $Ca^{2+}$ 含量之间相关性最强，相关系数最高达 0.88；其次是根 $Ca^{2+}$ 含量与茎 $Ca^{2+}$ 含量、根 $K^+$ 含量与叶 $K^+$ 含量，相关系数均为 0.86；相关性较弱的指标为根生物量与茎 $Mg^{2+}$ 含量、苗高与针叶长、苗高与根生物量、针叶长与根 $Na^+$ 含量、苗高与根 $K^+$ 含量、针叶长与叶 $Mg^{2+}$ 含量，其相关系数为 0.40～0.42。

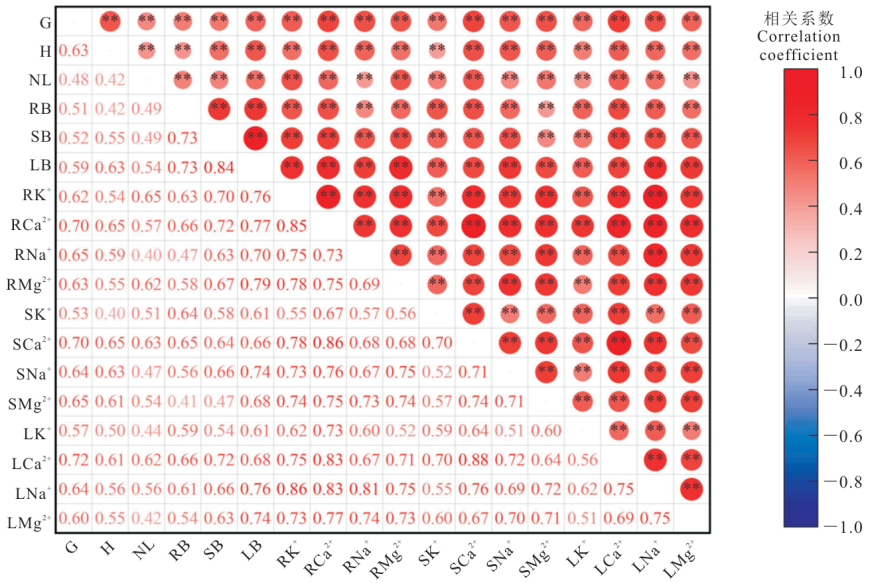
### 2.4　湿地松幼苗生长及矿质营养元素含量的主成分分析

由图 2 可见，不同岩溶裂隙和降雨间隔时长下，湿地松幼苗各器官生长量、生物量及矿质营养元素含量主成分关系表现不同。对所测的各项指标共提取 2 个主成分（PC1、PC2），其累计方差贡献率为 72.2%，可代表各指标的大部分信息。PC1 方差贡献率为 66.9%，具有较大正向载荷性状的是根 $Ca^{2+}$ 含量（$RCa^{2+}$）、根 $K^+$ 含量（$RK^+$）、根 $Mg^{2+}$ 含量（$RMg^{2+}$）、茎 $Ca^{2+}$ 含量（$SCa^{2+}$）、叶 $Na^+$ 含量（$LNa^+$）、叶 $Ca^{2+}$ 含量（$LCa^{2+}$）、叶生物量（LB）、茎 $Na^+$ 含量（$SNa^+$）、叶 $Mg^{2+}$ 含量（$LMg^{2+}$）、茎 $Mg^{2+}$ 含量（$SMg^{2+}$）、根 $Na^+$ 含量（$RNa^+$）和茎生物量（SB）。PC2 方差贡献率为 5.3%，其中根生物量（RB）、茎 $K^+$ 含量（$SK^+$）和 SB 载荷值较大。由此可见，在不同岩溶裂隙和降雨间隔时长下，对各指标进行主成分分析得出累计方差贡献率为 72.2%，能代表绝大多数指标的信息。

### 2.5　不同岩溶生境和降雨间隔时长下湿地松幼苗生长的模糊隶属函数综合评价

模糊隶属函数分析结果（表 6）显示，湿地松幼苗在不同岩溶裂隙和降雨间隔时长下平均隶属函数值的大小依次表现为 $I_{3d}S_{1/4}$＞$I_{3d}S_0$＞$I_{6d}S_{1/4}$＞$I_{3d}S_{1/2}$＞$I_{6d}S_0$＞$I_{9d}S_0$＞$I_{6d}S_{1/2}$＞$I_{9d}S_{1/4}$＞$I_{9d}S_{1/2}$。由此可知，$I_{3d}S_{1/4}$ 为最优处理组，表明减少降雨间隔时长下增加岩溶

裂隙可以促进湿地松幼苗的生长。结合前面的分析也可以看出,在该处理下湿地松幼苗生长最好,其次是$I_{3d}S_0$和$I_{6d}S_{1/4}$处理,说明减少降雨间隔时长的同时适当增加岩溶裂隙,可以促进湿地松幼苗的生长;隶属度最差的处理组是$I_{9d}S_{1/2}$,表明中度石漠化和延长降雨间隔时长会抑制湿地松幼苗的生长。




红色表示正相关,蓝色表示负相关;颜色越深相关性越显著。*、**分别表示相关性在0.05和0.01达到显著和极显著水平。G、H、NL、RB、SB、LB、$RK^+$、$RCa^{2+}$、$RNa^+$、$RMg^{2+}$、$SK^+$、$SCa^{2+}$、$SNa^+$、$SMg^{2+}$、$LK^+$、$LCa^{2+}$、$LNa^+$、$LMg^{2+}$分别代表地径、苗高、针叶长、根生物量、茎生物量、叶生物量、根$K^+$含量、根$Ca^{2+}$含量、根$Na^+$含量、根$Mg^{2+}$含量、茎$K^+$含量、茎$Ca^{2+}$含量、茎$Na^+$含量、茎$Mg^{2+}$含量、叶$K^+$含量、叶$Ca^{2+}$含量、叶$Na^+$含量、叶$Mg^{2+}$含量。下同。

Red and blue indicate positive and negative correlations, respectively; Darker the color, the more significant the correlation. *, ** indicate significant and extremely significant correlations at 0.05, 0.01 respectively. G, H, NL, RB, SB, LB, $RK^+$, $RCa^{2+}$, $RNa^+$, $RMg^{2+}$, $SK^+$, $SCa^{2+}$, $SNa^+$, $SMg^{2+}$, $LK^+$, $LCa^{2+}$, $LNa^+$, $LMg^{2+}$ represent ground diameter, seedling height, needle length, root biomass, stem biomass, leaf biomass, root $K^+$ content, root $Ca^{2+}$ content, root $Na^+$ content, root $Mg^{2+}$ content, stem $K^+$ content, stem $Ca^{2+}$ content, stem $Na^+$content, stem $Mg^{2+}$ content, leaf $K^+$ content, leaf $Ca^{2+}$ content, leaf $Na^+$ content, leaf $Mg^{2+}$ content. The same below.

图1 湿地松幼苗生长及矿质营养元素含量之间的相关性

Fig. 1 Correlation between growth parameters and mineral nutrient contents in *Pinus elliottii* seedlings

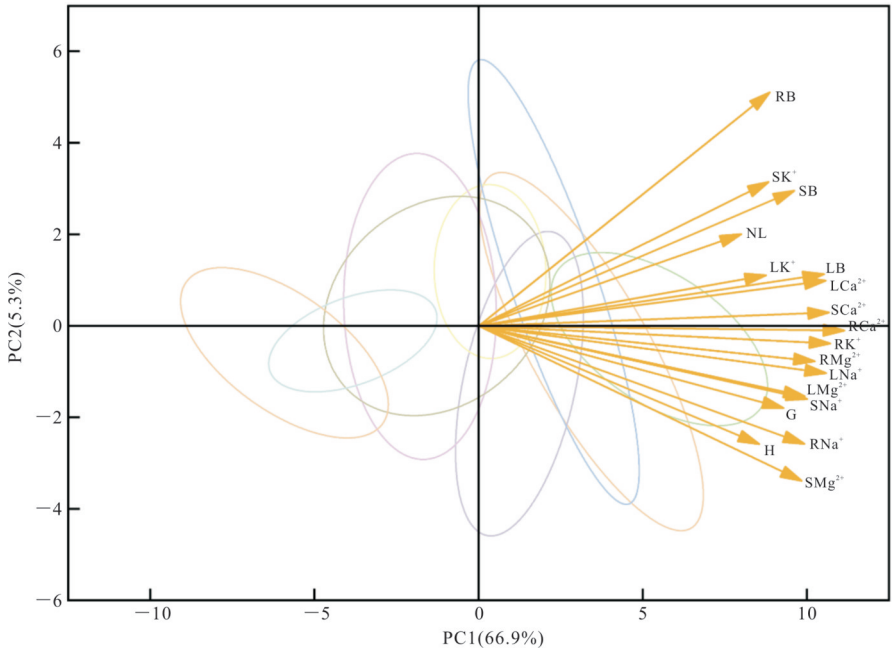



图2 湿地松幼苗生长及矿质营养元素含量的主成分分析

Fig. 2 Principal component analysis of growth parameters and mineral nutrient contents in *Pinus elliottii* seedlings

**表 6　不同岩溶生境和降雨间隔时长下湿地松幼苗生长及矿质营养元素含量的隶属度分析**

Table 6　Membership analysis of *Pinus elliottii* seedlings growth and mineral nutrient contents under different Karst habitats and rainfall intervals

| 指标 Indicator | $I_{3d}S_0$ | $I_{3d}S_{1/4}$ | $I_{3d}S_{1/2}$ | $I_{6d}S_0$ | $I_{6d}S_{1/4}$ | $I_{6d}S_{1/2}$ | $I_{9d}S_0$ | $I_{9d}S_{1/4}$ | $I_{9d}S_{1/2}$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| G | 0.856 9 | 1.000 0 | 0.512 7 | 0.334 3 | 0.723 4 | 0.273 4 | 0.390 7 | 0.430 0 | 0.000 0 |
| H | 0.872 6 | 1.000 0 | 0.819 1 | 0.613 2 | 0.722 4 | 0.394 8 | 0.316 3 | 0.458 5 | 0.000 0 |
| NL | 0.897 7 | 1.000 0 | 0.468 8 | 0.713 1 | 0.843 8 | 0.284 1 | 0.517 0 | 0.596 6 | 0.000 0 |
| RB | 0.743 1 | 0.889 1 | 0.464 8 | 0.973 8 | 1.000 0 | 0.480 4 | 0.678 6 | 0.222 8 | 0.000 0 |
| SB | 0.945 4 | 0.978 4 | 0.660 7 | 0.917 7 | 1.000 0 | 0.763 2 | 0.463 3 | 0.179 3 | 0.000 0 |
| LB | 0.972 7 | 1.000 0 | 0.762 6 | 0.925 8 | 0.899 9 | 0.712 6 | 0.275 0 | 0.138 7 | 0.000 0 |
| $RK^+$ | 0.937 1 | 1.000 0 | 0.679 2 | 0.560 6 | 0.638 8 | 0.267 7 | 0.480 7 | 0.025 2 | 0.000 0 |
| $RCa^{2+}$ | 0.698 3 | 1.000 0 | 0.562 5 | 0.328 0 | 0.714 1 | 0.308 8 | 0.384 2 | 0.080 3 | 0.000 0 |
| $RNa^+$ | 0.925 7 | 1.000 0 | 0.760 0 | 0.448 6 | 0.480 0 | 0.382 9 | 0.305 7 | 0.134 3 | 0.000 0 |
| $RMg^{2+}$ | 0.965 5 | 1.000 0 | 0.838 9 | 0.595 2 | 0.685 6 | 0.441 0 | 0.366 1 | 0.296 3 | 0.000 0 |
| $SK^+$ | 0.736 1 | 1.000 0 | 0.442 5 | 0.571 0 | 0.642 8 | 0.322 1 | 0.387 0 | 0.132 6 | 0.000 0 |
| $SCa^{2+}$ | 0.585 2 | 1.000 0 | 0.423 4 | 0.349 1 | 0.620 1 | 0.236 6 | 0.426 7 | 0.196 5 | 0.000 0 |
| $SNa^+$ | 0.837 6 | 1.000 0 | 0.713 4 | 0.480 9 | 0.652 9 | 0.270 7 | 0.404 5 | 0.057 3 | 0.000 0 |
| $SMg^{2+}$ | 0.856 7 | 1.000 0 | 0.728 3 | 0.319 8 | 0.440 9 | 0.024 0 | 0.195 0 | 0.022 2 | 0.000 0 |
| $LK^+$ | 0.726 2 | 1.000 0 | 0.457 5 | 0.548 8 | 0.775 7 | 0.282 6 | 0.387 8 | 0.059 6 | 0.000 0 |
| $LCa^{2+}$ | 0.580 4 | 1.000 0 | 0.471 1 | 0.399 7 | 0.720 3 | 0.311 9 | 0.466 9 | 0.205 5 | 0.000 0 |
| $LNa^+$ | 0.800 0 | 1.000 0 | 0.736 4 | 0.509 1 | 0.675 8 | 0.451 5 | 0.463 6 | 0.115 2 | 0.000 0 |
| $LMg^{2+}$ | 0.906 0 | 1.000 0 | 0.773 0 | 0.475 2 | 0.688 8 | 0.269 5 | 0.304 1 | 0.066 5 | 0.000 0 |
| 均值 Mean value | 0.824 6 | 0.992 6 | 0.626 4 | 0.559 1 | 0.718 1 | 0.359 9 | 0.400 7 | 0.189 8 | 0.000 0 |
| 排名 Ranking | 2 | 1 | 4 | 5 | 3 | 7 | 6 | 8 | 9 |

注：表中“指标”编号及其含义同图 1。

Nate：The indicator numbers and their meanings in the table are the same as Fig. 1.

## 3　讨　论

### 3.1　湿地松幼苗的生长量及生物量

降雨是岩溶地区植物主要的水分来源之一，其变化必然会影响植物的生长量和生物量分配，从而影响植物的整体生长，植物通过调整自身的形态结构和生物量分配来适应降雨格局[31-33]。本研究中，湿地松幼苗地径、苗高和针叶长随岩溶裂隙加深呈现出先增加后减少的显著变化规律，在 $S_{1/4}$ 处理下达最大，这与王佳敏等[34]对桢楠幼苗的研究结果相似。本研究中，在 3 d 和 6 d 降雨间隔时长下，与全土（$S_0$）生境相比，$S_{1/2}$ 生境显著降低了湿地松幼苗的总生物量，这可能是由于在 $S_{1/2}$ 生境下其土层变得浅薄、水分渗透性强，岩溶生境极其脆弱，使其水源和营养资源缺乏[33]，从而抑制了湿地松幼苗总生物量的生长。本研究中，$S_{1/4}$ 岩溶生境并未对湿地松幼苗各器官生物量产生太大影响，这与郭旭曼等[9]对桢楠幼苗的研究结果相似。这可能是因为适当的岩溶裂隙增加了土壤透气性，可以为湿地松幼苗提供一定的舒适环境，进而促进湿地松幼苗的生长。在同一岩溶生境下，湿地松幼苗的生长量随着降雨间隔时长的增加表现出逐渐下降的显著变化规律，说明延长降雨间隔时长会降低湿地松幼苗生长量，即延长降雨间隔将使植物经受更长的持续干旱时间[35]，进而抑制湿地松幼苗的生长。

根系作为植物对水分变化最敏感的器官，在遭受不良环境干扰时会获取更多的生物量供植物生长[36]。本研究中，在 9 d 降雨间隔时长下湿地松幼苗各生物量分配表现为根＞茎＞叶，且根冠比增加，这与白蕾等[32]、李阳等[37]的研究结果相一致，可能是 9 d 降雨间隔时长的干旱胁迫对植物生长造成了不利影响，植物为了更好地适应生存环境，将更多生物量分配给根，从而增大植物根冠比，并通过根获取更多的水分供湿地松幼苗生长。但该结果与张荣等[38]对白刺幼苗的研究结果相悖，可能是白刺幼苗生长地区与湿地松幼苗不同，白刺幼苗生长地区的降雨可以向更深的土层中渗透，通过蒸发而损失掉的水分比例相对较小，随着降雨间隔时间延长，深层土壤中含水量会增加，可供植物利用的水量变多，且存在时间更长，从而促进了白刺幼苗的生长；而湿地松幼苗处于岩溶地貌中，土壤水分易流失，不利于湿地松幼苗生长。综上所述，湿地松幼苗在岩溶生境下会

通过调整自身的根长和根生物量来适应该地区的降雨变化,湿地松幼苗的生物量分配方式体现了岩溶地区植物适应环境的生存策略。

### 3.2 湿地松幼苗的矿质营养元素含量

植物必需矿质营养元素在植物的生长发育过程中起着重要作用,不同逆境胁迫会影响植物对矿质营养元素的吸收[39]。本研究发现,3 d和6 d降雨间隔时长下湿地松幼苗矿质营养元素含量在不同岩溶生境下呈现先增加后减少的变化趋势,这可能是适当的岩溶裂隙增加了土壤的透气性,有利于植物生长,并能积累更多矿质营养元素[34]。9 d降雨间隔时长下湿地松幼苗矿质营养元素积累逐渐下降,在$S_{1/2}$生境下最低,这可能与岩溶胁迫和降雨间隔时间较长有关[40]。湿地松幼苗矿质营养元素含量表现为$Ca^{2+}>Mg^{2+}>K^{+}>Na^{+}$,$Ca^{2+}$含量最高可能与喀斯特岩溶地貌有关,喀斯特地区广泛分布着暴露在地表的碳酸盐岩,这些岩石在长期风化和雨水侵蚀作用下塑造了独特的自然地貌,该地区的土壤通常富含$K^{+}$、$Ca^{2+}$、$Mg^{2+}$等元素,因此生长在岩溶地区的植物往往表现出高$Ca^{2+}$和$Mg^{2+}$的特征[41];同时碳酸盐富含高$Ca^{2+}$[42],因此湿地松幼苗所含$Ca^{2+}$最多。通常情况下,矿质营养元素经根系表面吸收后被运输到根、茎、叶等各个器官,为植物所用并表现出各种生物学功能[43]。湿地松幼苗各器官元素含量积累表现为根>茎>叶,即湿地松幼苗养分积累主要倾向于根,这说明湿地松为了能在岩溶地区生长,会将更多养分分配给根,从而保证根的生长发育,这是由于岩溶裂隙会造成一定的干旱胁迫,湿地松会调整自身的根系结构,以增加吸收土壤中的水分和养分,进而应对岩溶裂隙带来的干旱胁迫[44]。在同一岩溶生境下,湿地松幼苗矿质营养元素含量随着降雨间隔时长的增加呈现出逐渐下降的显著变化趋势(除$S_0$生境下的$Ca^{2+}$),这主要是由降雨间隔时长增加导致的干旱胁迫造成的。

有研究者认为,在植物细胞质中维持高于一定含量的$K^{+}$对植物耐盐性很必要,但由于$Na^{+}$和$K^{+}$具有相似的离子半径和水合能,二者之间会产生明显的拮抗效应,因此当$Na^{+}$含量过高时会抑制$K^{+}$吸收,导致$K^{+}$吸收受限[45]。本研究中,$K^{+}$含量高于$Na^{+}$,说明湿地松幼苗具有一定的耐盐性。还有研究者将$K^{+}/Na^{+}$值看作植物耐盐性的重要评价指标,认为$K^{+}/Na^{+}$值与植物耐盐性呈正相关关系[46]。本研究中,干旱胁迫和岩溶胁迫使湿地松幼苗各器官的$K^{+}/Na^{+}$值均有所提高,叶$K^{+}/Na^{+}$值在9 d降雨间隔时长、$S_{1/2}$岩溶生境处理中最大,根$K^{+}/Na^{+}$在9 d降雨间隔时长、$S_0$岩溶生境处理中最大,茎$K^{+}/Na^{+}$在9 d降雨间隔时长、$S_{1/4}$岩溶生境处理中最大,且叶$K^{+}/Na^{+}$值在所有处理中最大,这与茶晓飞等[47]关于钙胁迫对白枪杆幼苗生长及矿质离子代谢影响的研究结果相似。说明在延长降雨间隔时长下湿地松幼苗可将$Na^{+}$截留到茎部,选择性地将地下的$K^{+}$输送到湿地松幼苗叶片中,以提高叶片中的$K^{+}/Na^{+}$值,增强湿地松幼苗叶片的生理功能,缓解干旱胁迫和岩溶胁迫对湿地松幼苗的损伤。

植物体内不同矿质营养元素之间存在相互促进或拮抗作用[48]。在本研究中,湿地松幼苗各器官内不同矿质营养元素之间均表现为相互促进作用,其中叶$Ca^{2+}$含量与茎$Ca^{2+}$含量、根$Ca^{2+}$含量与茎$Ca^{2+}$含量呈极显著正相关,这可能是岩溶地区具有较高的$Ca^{2+}$含量,导致根吸收$Ca^{2+}$较多,从而运输到湿地松幼苗的地上部分,用以维持幼苗的组织结构;根$K^{+}$含量与叶$K^{+}$含量也呈极显著正相关,说明根选择性地将$K^{+}$运输到叶片,以维持叶片的高$K^{+}/Na^{+}$值,从而提高植物耐盐性。

## 4 结 论

岩溶生境和降雨间隔时长对湿地松幼苗的生长和矿质营养元素含量都有不同程度的影响且彼此相互制约。湿地松幼苗各生理生长指标之间均呈极显著正相关($P<0.01$),说明各生理生长指标之间具有协同作用。模糊隶属函数分析结果表明,湿地松幼苗隶属度在不同处理下表现为$I_{3d}S_{1/4}>I_{3d}S_0>I_{6d}S_{1/4}>I_{3d}S_{1/2}>I_{6d}S_0>I_{9d}S_0>I_{6d}S_{1/2}>I_{9d}S_{1/4}>I_{9d}S_{1/2}$,即$I_{3d}S_{1/4}$处理下湿地松幼苗生长最好,其次是$I_{3d}S_0$和$I_{6d}S_{1/4}$处理,而$I_{9d}S_{1/2}$处理下的湿地松幼苗生长最差。总之,延长降雨间隔时长对湿地松幼苗的生长有抑制作用,减少降雨间隔时长可以促进湿地松幼苗生长,适当增加岩溶裂隙也能促进湿地松幼苗生长。因此在岩溶生境下,湿地松幼苗在减少降雨间隔时长或正常降雨时能生长得更好。

**[参考文献]**

[1] ZHU D Y, XIONG K N, XIAO H. Multi-time scale variability of rainfall erosivity and erosivity density in the Karst region of Southern China, 1960-2017[J]. Catena, 2021, 197: 104977.

[2] 袁道先. 中国岩溶学[M]. 北京:地质出版社, 1994.
YUAN D X. Karst science in China[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1994.

[3] 王俊丽，张忠华，胡刚，等. 基于文献计量分析的喀斯特植被生态学研究态势[J]. 生态学报，2020，40(3)：1113-1124.
WANG J L，ZHANG Z H，HU G，et al. Research situation of Karst vegetation ecology based on bibliometric analysis [J]. Acta Ecologica Sinica，2020，40(3)：1113-1124.

[4] 张军以，戴明宏，王腊春，等. 西南喀斯特石漠化治理植物选择与生态适应性[J]. 地球与环境，2015，43(3)：269-278.
ZHANG J Y，DAI M H，WANG L C，et al. Plant selection and their ecological adaptation for rocky desertification control in Karst region in the southwest of China[J]. Earth and Environment，2015，43(3)：269-278.

[5] 尹晗，李耀辉. 我国西南干旱研究最新进展综述[J]. 干旱气象，2013，31(1)：182-193.
YIN H，LI Y H. Summary of advance on drought study in southwest China [J]. Journal of Arid Meteorology，2013，31(1)：182-193.

[6] 陈青松，舒英格，周鹏鹏，等. 喀斯特山区不同生态恢复下石灰土钙形态特征[J]. 水土保持学报，2020，34(4)：48-55.
CHEN Q S，SHU Y G，ZHOU P P，et al. Calcium components of calcareous soil under different ecological restoration patterns in Karst mountainous area[J]. Journal of Soil and Water Conservation，2020，34(4)：48-55.

[7] 袁二双，周秋文，严卫红，等. 喀斯特林地冬季土壤水分对降雨的响应特征[J]. 生态科学，2023，42(4)：56-63.
YUAN E S，ZHOU Q W，YAN W H，et al. Response of soil moisture to rainfall in forest land in a Karst region during winter season[J]. Ecological Science，2023，42(4)：56-63.

[8] YANG H T，LI X R，LIU L C，et al. Characteristics of biomass allocation of four shrub species in desert grassland[J]. Journal of Desert Research，2013，33(5)：1340-1348.

[9] 郭旭曼，王佳敏，杜浩瀚，等. 楠楠幼苗适应喀斯特岩溶裂隙生境及降雨时间格局变化的方式[J]. 生态学报，2023，43(1)：379-387.
GUO X M，WANG J M，DU H H，et al. *Phoebe zhennan* S. Lee seedlings adjust the biomass allocation and root distribution to adapt to the Karst fissure habitat and rainfall temporal pattern [J]. Acta Ecologica Sinica，2023，43(1)：379-387.

[10] 郑绍傑，孙丽娟，董琼，等. 不同降雨量对树番茄幼苗生物量、叶片性状和碳氮磷的影响[J]. 核农学报，2025，39(3)：655-667.
ZHENG S J，SUN L J，DONG Q，et al. Effects of different rainfalls on the biomass，leaf traits，and carbon，nitrogen，and phosphorus of *Cyphomandra betacea* seedlings[J]. Journal of Nuclear Agricultural Sciences，2025，39(3)：655-667.

[11] 李超，林伟盛，杨智杰，等. 中亚热带杉木人工幼林林下植被生物量对短期增温和隔离降雨交互作用的响应[J]. 生态学杂志，2020，39(8)：2528-2537.
LI C，LIN W S，YANG Z J，et al. Interactive effects of short-term warming and precipitation exclusion on undergrowth vegetation biomass in a Chinese fir（*Cunninghamia lanceolata*）plantation in mid-subtropical China [J]. Chinese Journal of Ecology，2020，39(8)：2528-2537.

[12] 刘玲，罗剑洪，李丙文，等. 咸水滴灌对肉苁蓉寄生体系盐离子分配及品质的影响[J]. 干旱区研究，2022，39(3)：908-915.
LIU L，LUO J H，LI B W，et al. Effect of saline water drip irrigation on salt ions distribution for the *Haloxylon ammoedndron-Cistanche deserticola* association（H-C association）and quality of *Cistanche deserticola* Ma[J]. Arid Zone Research，2022，39(3)：908-915.

[13] 王伟伟，未敏，教忠意，等. 不同盐分立地对榆树生长及$Na^+$、$K^+$、$Ca^{2+}$、$Mg^{2+}$在体内分配的影响[J]. 江苏林业科技，2017，44(3)：1-4.
WANG W W，WEI M，JIAO Z Y，et al. Effects of different salt sites on the growth and distribution of $Na^+$，$K^+$，$Ca^{2+}$ and $Mg^{2+}$ in elm[J]. Journal of Jiangsu Forestry Science & Technology，2017，44(3)：1-4.

[14] 郭文，焦鹏宇，唐楚珺，等. 不同林龄杉木根际和非根际土壤矿质养分含量及根际效应[J]. 福建农林大学学报(自然科学版)，2022，51(4)：533-539.
GUO W，JIAO P Y，TANG C J，et al. Mineral nutrient contents of rhizosphere and non-rhizosphere soils in *Cunninghamia lanceolata* plantations at different stand ages and rhizosphere effects[J]. Journal of Fujian Agriculture and Forestry University（Natural Science Edition），2022，51(4)：533-539.

[15] 李泰，卢士军，黄家章，等. 土壤养分对'富士'苹果品质的影响：基于3省6县苹果园调查[J]. 中国农业大学学报，2024，29(11)：30-38.
LI T，LU S J，HUANG J Z，et al. Effects of soil nutrients on the quality of 'Fuji' apple：based on a survey of apple orchards in 6 counties in 3 provinces[J]. Journal of China Agricultural University，2024，29(11)：30-38.

[16] 陈翠萍，周美玉，周朝彬，等. 顶坛花椒衰退对生长、结实和养分储存的影响[J]. 生态学杂志，2024，43(7)：2127-2133.
CHEN C P，ZHOU M Y，ZHOU C B，et al. Effects of *Zanthoxylum planispinum* var. *dintanensis* decline on growth，fruiting，and nutrient storage [J]. Chinese Journal of Ecology，2024，43(7)：2127-2133.

[17] 张闯，邹洪涛，张心昱，等. 氮添加对湿地松林土壤水解酶和氧化酶活性的影响[J]. 应用生态学报，2016，27(11)：3427-3434.
ZHANG C，ZOU H T，ZHANG X Y，et al. Effects of nitrogen additions on soil hydrolase and oxidase activities in *Pinus elliottii* plantations[J]. Chinese Journal of Applied Ecology，2016，27(11)：3427-3434.

[18] 张必成. 湿地松优化培育技术措施及其效果分析[J]. 内蒙古林业调查设计，2012，35(4)：63-64.
ZHANG B C. Technical measures and effect analysis of optimized cultivation of *Pinus elliottii*[J]. Inner Mongolia Forestry Investigation and Design，2012，35(4)：63-64.

[19] 杜杰，袁莉芹，蔡天培，等. 亚热带北缘湿地松脂材兼用林凋落物持水特性[J]. 安徽农业大学学报，2022，49(1)：41-47.
DU J，YUAN L Q，CAI T P，et al. The water-holding characteristics of litterfall in *Pinus elliottii* plantations for resin and timber in northern of subtropical area[J]. Journal of Anhui Agricultural University，2022，49(1)：41-47.

[20] 杨予静，李昌晓，张晔，等. 水淹-干旱交替胁迫对湿地松幼苗盆

栽土壤营养元素含量的影响[J]. 林业科学,2013,49(2):55-65.
YANG Y J,LI C X,ZHANG Y,et al. Effects of submergence and drought alternation on nutrient contents in the soil growing slash pine (*Pinus elliottii*) seedlings[J]. Scientia Silvae Sinicae,2013,49(2):55-65.

[21] PAVINATO P S,MONDARDO J T,MARANGON R J,et al. Growth and nutrient uptake by slash pine seedlings under phosphate fertilizer sources[J]. Revista Brasileira de Ciências Agrárias-Brazilian Journal of Agricultural Sciences,2014,9(1):103-109.

[22] 王振夏,魏虹,李昌晓,等. 土壤水分交替变化对湿地松幼苗光合特性的影响[J]. 西北植物学报,2012,32(5):980-987.
WANG Z X,WEI H,LI C X,et al. Effect of soil moisture variations on photosynthetic characteristics of slash pine seedlings[J]. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica,2012,32(5):980-987.

[23] 吴月燕,项锡娜,王忠华,等. 光胁迫对容器幼苗生长和生理生化特性的影响[J]. 植物生理学报,2013,49(5):469-476.
WU Y Y,XIANG X N,WANG Z H,et al. Effects of light stress on the physiological,biochemical characteristics and growth of vessel seedling[J]. Plant Physiology Journal,2013,49(5):469-476.

[24] VAN DEN DRIESSCHE R. Different effects of nitrate and ammonium forms of nitrogen on growth and photosynthesis of slash pine seedlings[J]. Australian Forestry,1972,36(2):125-137.

[25] FERREIRA A G,FIOR C S,GUALTIERI S C J. Oleoresin yield of *Pinus elliottii* Engelm seedlings[J]. Brazilian Journal of Plant Physiology,2011,23(4):313-316.

[26] GUO Y,SHEN Y F,CHENG R M,et al. Effects of repetitive submergence on the accumulation and release of nutrient elements in *Pinus elliottii* seedlings[J]. Environmental Science and Pollution Research,2021,28(21):27420-27431.

[27] 向志勇,邓湘雯,田大伦,等. 五种植被恢复模式对邵阳县石漠化土壤理化性质的影响[J]. 中南林业科技大学学报,2010,30(2):23-28.
XIANG Z Y,DENG X W,TIAN D L,et al. Effects of 5 patterns vegetation restoration on soil physical-chemical properties in rocky desertification area in Shaoyang County[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology,2010,30(2):23-28.

[28] 杨晏平,周娟,赵江萍,等. 滇西地区湿地松人工林生长过程分析[J]. 西部林业科学,2020,49(1):128-132.
YANG Y P,ZHOU J,ZHAO J P,et al. Growth process analysis of *Pinus elliottii* in western Yunnan[J]. Journal of West China Forestry Science,2020,49(1):128-132.

[29] 刘明翰,秦年秀,陈燕连,等. 1960－2016年西南地区无有效降水日数变化特征[J]. 人民珠江,2020,41(4):21-29.
LIU M H,QIN N X,CHEN Y L,et al. Study on change characteristics of non effective precipitation days in southwest China from 1960 to 2016[J]. Pearl River,2020,41(4):21-29.

[30] 李宝芬. 昆明市年降水量时空分布特征[C]//云南省水利学会. 云南省水利学会2016年度学术年会论文集. 昆明:云南省水文水资源局昆明分局,2016:123-133.
LI B F. Spatial-temporal distribution characteristics of annual precipitation in Kunming City[C]//Yunnan Water Conservancy Society. Proceedings of the 2016 academic annual conference of Yunnan Water Conservancy Society. Kunming:Kunmin Branch of Yunnan Provincial Hydrological and Water Resources Bureau,2016:123-133.

[31] 王升,包小怀,容莹,等. 降雨强度对西南喀斯特坡地土壤水分及产流特征的影响[J]. 农业现代化研究,2020,41(5):889-898.
WANG S,BAO X H,RONG Y,et al. Study on soil moisture variation and runoff characteristics on typical Karst slope under different rainfall intensities[J]. Research of Agricultural Modernization,2020,41(5):889-898.

[32] 白蕾,单立山,李毅,等. 降雨格局变化对红砂幼苗根系生长和生物量分配的影响[J]. 西北植物学报,2017,37(1):163-170.
BAI L,SHAN L S,LI Y,et al. Effects of changing rainfall patterns on the root and biomass of *Reaumuria soongorica* seedlings[J]. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica,2017,37(1):163-170.

[33] 梁燕,刘家齐,肖凡,等. 氮沉降形态对西南岩溶区森林土壤有效磷来源的影响[J]. 生态环境学报,2024,33(2):192-201.
LIANG Y,LIU J Q,XIAO F,et al. Effects of nitrogen deposition forms on sources of soil available phosphorus in Karst forest of southwest China[J]. Ecology and Environmental Sciences,2024,33(2):192-201.

[34] 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楠幼苗光合和生长的影响[J]. 生态学报,2021,41(18):7348-7356.
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 Ecologica Sinica,2021,41(18):7348-7356.

[35] FAY P A,CARLISLE J D,KNAPP A K,et al. Productivity responses to altered rainfall patterns in a $C_4$-dominated grassland[J]. Oecologia,2003,137(2):245-251.

[36] 菲鲁然·艾勒肯,戴 岳,安外尔·阿卜杜热伊木. 克里雅河尾闾不同地下水埋深对多枝柽柳幼苗根系形态和生物量分配的影响[J]. 生态学报,2025,45(8):4036-4045.
FLORA E,DAI Y,ANWAR A. Effects of different groundwater depths on the root morphology and biomass allocation of *Tamarix ramosissima* Ledeb. seedlings at the tail of the Keriya River[J]. Acta Ecologica Sinica,2025,45(8):4036-4045.

[37] 李阳,齐曼·尤努斯,祝燕. 水分胁迫对大果沙枣光合特性及生物量分配的影响[J]. 西北植物学报,2006,26(12):2493-2499.
LI Y,QIMAN Y,ZHU Y. Effects of water stress on photosynthetic characteristics and biomass partition of *Elaeagnus moorcroftii*[J]. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica,2006,26(12):2493-2499.

(下转第69页)