

官守鹏, 陈芳清, 吕坤, 周菊梅, 夏萍娟. 疏花水柏枝幼苗生物量与构件对模拟土壤地下水位变化的响应[J]. 植物科学学报, 2019, 37(4): 485~494

Guan SP, Chen FQ, Lü K, Zhou JM, Xia PJ. Responses of biomass and components of *Myricaria laxiflora* seedlings to simulated soil water level changes [J]. *Plant Science Journal*, 2019, 37(4): 485~494

疏花水柏枝幼苗生物量与构件对模拟土壤地下水位变化的响应

官守鹏¹, 陈芳清^{1*}, 吕坤¹, 周菊梅¹, 夏萍娟²

(1. 湖北省三峡地区生态保护与治理国际联合研究中心, 湖北宜昌 443002;

2. 中国长江三峡集团有限公司流域枢纽运行管理局环境保护中心, 湖北宜昌 443000)

摘要: 通过模拟不同地下水位的方法, 对疏花水柏枝(*Myricaria laxiflora* (Franch.) P. Y. Zhang et Y. J. Zhang)一年生幼苗在不同条件下地上与地下部分生物量及构件的变化进行测定, 分析幼苗生长对地下水位变化的响应。结果显示: 随着地下水位的降低, 疏花水柏枝幼苗的生长特征指标均呈先增加后减少的趋势, 其中地上、地下部分生物量的最高值分别为0.0438、0.0100 g, 最低值分别为0.0177、0.0026 g。幼苗地上部生物量在-10 cm处理水平最高; 地下部生物量在-15 cm处理水平最高。幼苗直径、根表面积、株高、主根长度、根体积、一级枝数、二级枝数等指标也分别在-10 cm或-15 cm处理水平达到最高值。疏花水柏枝幼苗主要构件的生长与地下水位的变化存在显著相关性。主成分分析结果表明, 幼苗的地下部分更容易受到土壤地下水位变化的影响, 幼苗性状随地下水位的变化而发生移动, 说明该物种幼苗在不同地下水位时的生长投资策略具有较大差异。

关键词: 疏花水柏枝; 幼苗生长; 地下水位; 种群更新; 物种保护

中图分类号: Q945.17 **文献标识码:** A

文章编号: 2095-0837(2019)04-0485-10

DOI: 10.11913/PSJ.2095-0837.2019.40485

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Responses of biomass and components of *Myricaria laxiflora* seedlings to simulated soil water level changes

Guan Shou-Peng¹, Chen Fang-Qing^{1*}, Lü Kun¹, Zhou Ju-Mei¹, Xia Ping-Juan²

(1. *Hubei International Scientific and Technological Cooperation Center of Ecological Conservation and Management in Three Gorges Area, Yichang, Hubei 443002, China; Environmental Protection Center of Administration Bureau for Three Gorges Cascade Construction & Operation, CTG, Yichang, Hubei 443002, China*)

Abstract: We studied changes in biomass and components of one-year-old *Myricaria laxiflora* seedlings under different simulated soil water levels to reveal the response of seedling growth to these changing conditions. Results showed that the growth characteristics (aboveground and underground biomass, plant height, and length of main root) of one-year-old seedlings increased at first and then decreased with decreased soil water level. The highest aboveground and underground biomass values reached 0.0438 g and 0.0100 g, respectively, and the lowest values were 0.0177 g and 0.0026 g, respectively. The highest aboveground biomass was observed in the -10 cm treatment, whereas the highest underground biomass was observed in the -15 cm treatment. The seedling component indicators, including seedling

收稿日期: 2019-01-01, 退修日期: 2019-02-16。

基金项目: 国家自然科学基金项目(31770564)。

This work was supported by a grant from the National Natural Science Foundation of China (31770564).

作者简介: 官守鹏(1993-), 男, 硕士研究生, 研究方向为恢复生态学(E-mail: 1546608846@qq.com)。

* 通讯作者(Author for correspondence. E-mail: fqchen@ctgu.edu.cn)。

diameter, root surface area, plant height, root volume, primary branch number, and secondary branch number, also reached their highest values in the -10 cm or -15 cm treatments. There was a significant correlation between the growth of the main components of the seedlings and the change in soil water level. Principal component analysis indicated that the underground part of the seedlings was susceptible to changes in soil water level, and that the trait syndromes of seedling growth changed with changing soil water level. This suggests that the investment strategies of seedling growth differed among the different soil water levels.

Key words: *Myricaria laxiflora*; Seedling growth; Soil water level; Population regeneration; Species conservation

幼苗是植物生活史中最为脆弱的阶段，环境条件的变化可对幼苗的生长状况产生较大影响^[1, 2]。幼苗也是植物种群更新的关键阶段，其生长状况决定了幼苗质量及对环境变化的适应能力，并对种群规模具有决定性的影响^[3]。水位消涨是影响河岸带植物幼苗生长和种群更新的关键生态过程，由此引起的土壤干旱和水淹都会严重影响幼苗的生长与存活，并引起种群数量的急剧变化^[4, 5]。河岸带植物经过长期的进化，大多对水位消涨格局产生了一定的适应机制。在正常的水位消涨格局下，幼苗的生长都能够保持相对稳定的状态，以维持种群的自然更新^[6]；而当河流水位消涨格局发生明显变化时，幼苗生长与种群更新过程则会受到显著影响，严重时会使得种群更新过程受阻，种群衰退^[7, 8]。大型水电工程的建设往往会使大坝下游水位消涨格局发生急剧改变^[9]，并对河岸带植物幼苗的生长和种群更新过程产生影响^[10]。

疏花水柏枝(*Myricaria laxiflora* (Franch.) P. Y. Zhang et Y. J. Zhang)是柽柳科水柏枝属的一种多年生灌木。三峡工程的修建急剧抬高了库区的水位，淹没了其在库区的所有生境地，使该物种面临濒危^[5, 11]。目前仅在长江葛洲坝和向家坝下游的部分河段分布有少量的疏花水柏枝残存种群^[12]。这些大型电站因防洪发电的需要，对长江水流的调节改变了大坝下游长江水位的消涨格局，对疏花水柏枝位于长江葛洲坝下游残存种群生境地的水生态环境产生了重要影响，如推迟了生境地出露时期与植株恢复生长的时间，缩短了整个生长期；加快了水位下降的速度，提前了最小径流到来的时间，降低了枯水期的水位，并导致土壤含水量下降^[9, 13]。三峡库区下游疏花水柏枝残存种群年龄结构的野外调查结果显示，其残存种群存在幼苗数量极少、种

群更新受阻的问题^[14]。据此，本研究提出一个科学假设：疏花水柏枝残存种群幼苗的生长与地下水位密切相关，生境地水位涨落格局的改变及其所引起的地下水位与含水量的变化对幼苗生长及残存种群的更新产生了较大影响。本研究采用模拟不同地下水位的方法，对疏花水柏枝一年生幼苗在各处理下的生物量和构件的生长指标进行测定，分析地下水位变化对幼苗生长的影响，以期为阐明该物种残存种群幼苗更新受阻机制的研究奠定基础。

1 材料与方法

1.1 材料及实验设计

于2017年10月29日，从长江干流宜昌段江心岛胭脂坝(30°38'52"N、111°19'34"E)疏花水柏枝残存种群的植株上采集果序，装入信封中带回实验室。选择饱满的种子于培养皿中萌发，待种子萌发成幼苗后，将其植入长10 cm、宽10 cm、高25 cm的培养钵中继续培养，每个培养钵各种植1株幼苗。所用培养基质为采自长江干流宜昌段河滩的河沙，用前经风干后过40目土壤筛，然后烘干冷却。培养过程中每天浇水以保持培养基质湿润，待幼苗长成株高约为4 cm时，用于模拟地下水位的控制实验。

在培养箱中(长、宽、高分别为55、45、30 cm)进行地下水位控制实验。共设5个处理水平，包括：地下水位0 cm(表面略微积水)、-5 cm(水位低于地表5 cm)、-10 cm(水位低于地表10 cm)、-15 cm(水位低于地表15 cm)和-20 cm(水位低于地表20 cm)。每个处理重复20次。

将上述培养钵分别放入设置了不同地下水位的培养箱中。培养钵下部垫有木板，通过调节木板厚度使培养钵基质的地下水位符合实验要求。为保证

培养钵中多余的水分顺利流出，在培养钵低于地表处理水位处开若干小孔，水箱每天换水1次。换水方式为：上部进水速率和下部出水速率相同，保持水箱中的水面高度不变，避免换水过程对土壤含水量产生较大影响。于2018年5月11日开始进行模拟地下水位实验，60 d后测量实验指标。整个实验过程中未进行肥力补充。

1.2 幼苗生长指标的测定

分别测定各处理下疏花水柏枝幼苗的存活数量及其一级枝、二级枝的数量。在各处理植株的地上与地下分界处做好标记，将全株取出，用清水冲洗根部。沿标记处将幼苗剪断，分别测定植株的株高和茎的直径(茎上部、中部和基部的平均值)。然后将幼苗地上部分置于85℃烘箱内烘干至恒重^[15]，称量其地上部分的生物量。

将植株地下部分平铺在滤纸上，吸去多余水分。采用WinRHIZO根系分析系统(加拿大)对各植株根系的表面积、根体积、平均直径、根尖数和分叉数进行测定。然后将幼苗地下部分装入信封内，置于85℃烘箱中烘干至恒重^[15]，称量其地下部分生物量。

1.3 数据分析

分别将地上部生长指标(地上生物量、一级和二级枝数、株高、茎直径)和地下部生长指标(地下生物量、根表面积等)作为因变量，以地下水位为自变量，进行单因素方差分析(One-way ANOVA)，检验各个指标在处理间差异的显著性。

当因素处理效应达到显著水平时，再进行多重比较(SNK)，分析各处理间的差异水平。采用Pearson相关性对幼苗的地上、地下部生长指标与地下水位的相关性进行检验，并对其生长指标进行主成分分析与排序(按照特征值大于1的原则提取主成分)。采用SPSS 19.0软件进行数据分析。

2 结果与分析

2.1 幼苗生长的单因素方差分析

本研究以地下水位为自变量，疏花水柏枝幼苗的生长指标为因变量进行单因素方差分析，结果显示(表1)，地下水位对幼苗各生长指标均具有极显著性影响($P < 0.01$)。

2.2 幼苗地上部生物量及构件参数对地下水位的响应

研究结果显示，地下水位对疏花水柏枝幼苗地上部生物量及茎的构件参数具有显著影响($P < 0.05$)(图1)。地上部生物量随地下水位的降低呈先增加后降低的单峰变化规律，其最大值出现在-10 cm处理水平，为 (0.0438 ± 0.0030) g，分别比0、-5、-15、-20 cm处理水平高147.9%、34.1%、30.3%和94.7%。

此外，幼苗的茎直径、株高、一级枝数和二级枝数也随地下水位的降低呈先增加后降低的趋势(图1)。茎平均直径在-10 cm处理水平达到最高值，为 (0.96 ± 0.05) mm，分别比0和-20 cm处理水平高34.5%和66.5%；株高在-15 cm处理水平

表1 地下水位对幼苗生长指标的单因素方差分析

Table 1 One-way ANOVA test of the effects of soil water level on *Myricaria laxiflora* seedling growth

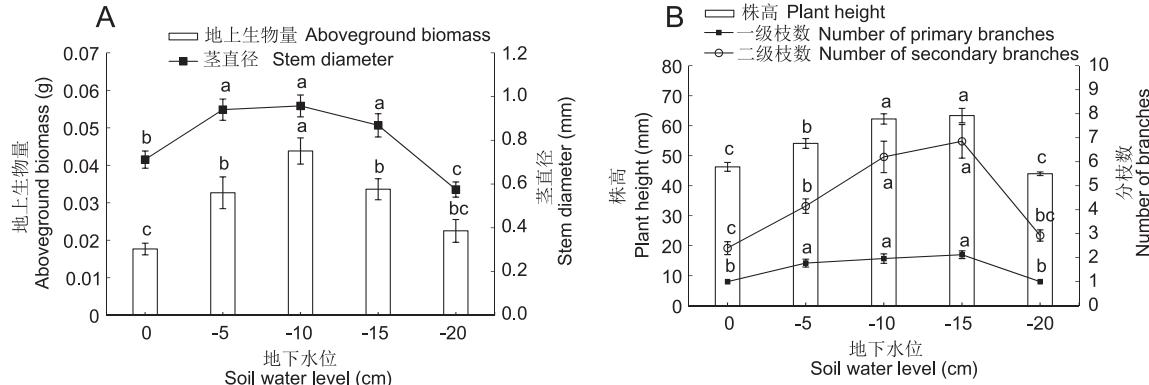
变量 Variable	平方和 Sum of square	df	均方 Mean square	F	显著性 P
地上生物量 Aboveground biomass	0.008	4	0.002	10.392	0.000
茎直径 Stem diameter	2.194	4	0.549	14.485	0.000
株高 Plant height	6497.549	4	1624.387	29.165	0.000
一级枝数 Number of primary branches	23.077	4	5.769	15.678	0.000
二级枝数 Number of secondary branches	308.510	4	77.128	17.603	0.000
地下生物量 Underground biomass	0.001	4	0.000	12.736	0.000
根表面积 Root surface area	211.117	4	52.779	32.001	0.000
主根长度 Length of main root	20329.701	4	5082.425	8.642	0.000
根体积 Root volume	0.041	4	0.010	28.078	0.000
根尖数 Root tips	29034.883	4	7258.721	15.293	0.000
根直径 Root diameter	0.322	4	0.081	19.778	0.000
根分叉数 Root forks	35180.774	4	8795.194	9.646	0.000

时最高, 为(63.39 ± 2.40) mm, 分别比0、-5、-20 cm 处理水平高36.9%、17.2%和44.1%; 幼苗的一级、二级枝数也在-15 cm 处理水平达到最高值。

2.3 幼苗地下部生物量及构件参数对地下水位的响应

本研究发现, 疏花水柏枝幼苗地下部生物量及

根构件参数在不同地下水位处理水平间存在显著差异($P < 0.05$)(图2)。地下部生物量随地下水位的降低呈先增加达到峰值后再降低的变化趋势, 最大值出现在-15 cm 处理水平, 为(0.0100 ± 0.0010) g; 但地下部生物量在-5、-10、-15 cm 处理水平间无显著差异, 最大值和0、-20 cm 处理水平相比, 分别高286.0%和131.8%。



不同字母表示在 $P < 0.05$ 水平上差异显著。下同。

Different letters indicate significant difference at $P < 0.05$. Same below.

图1 幼苗地上生物量及茎构件参数对地下水位的响应

Fig. 1 Responses of aboveground biomass and shoot components of seedlings to soil water level

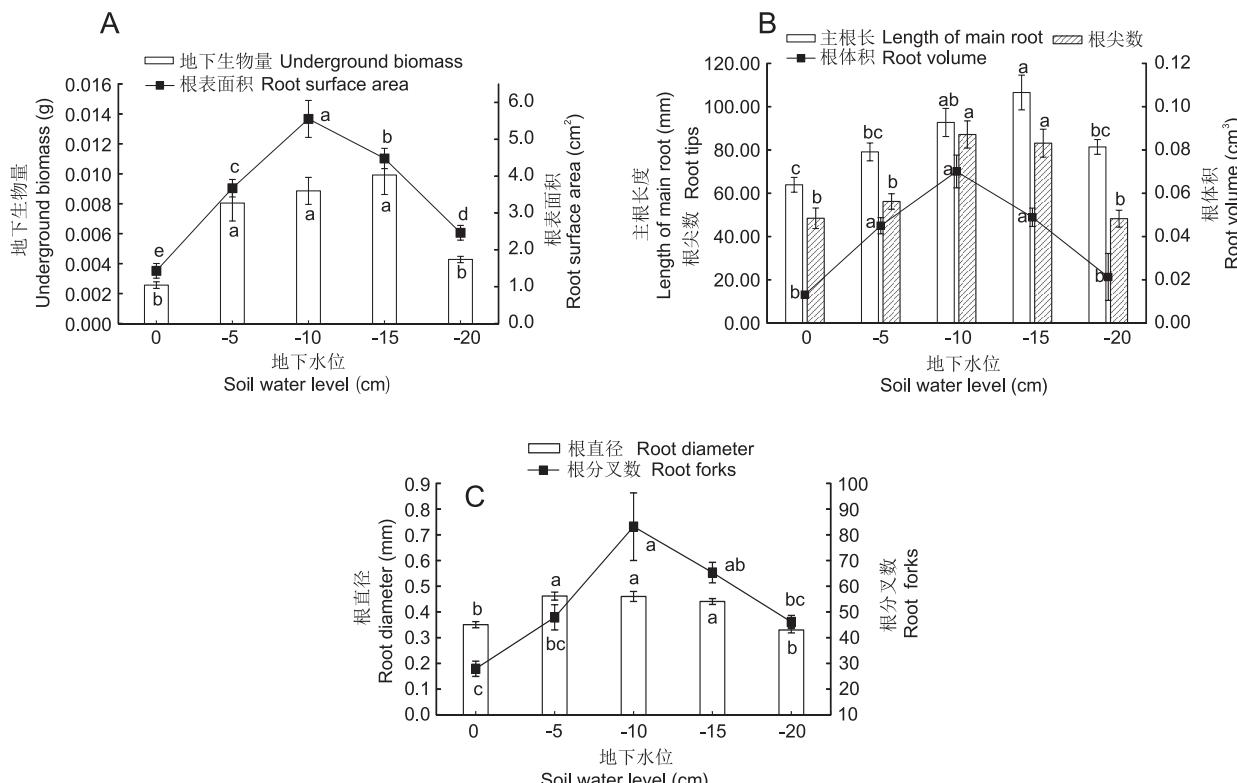


图2 幼苗地下生物量及根系构件对地下水位的响应

Fig. 2 Responses of underground biomass and root components of seedlings to soil water level

此外, 根表面积、根体积、根尖数、根平均直径和根分叉数也随地下水位的降低呈先增加达到峰值后再降低的变化趋势(图2)。根表面积在所有处理间均具有显著差异($P < 0.05$), 其最大值出现在-10 cm 处理水平, 为 $(5.55 \pm 0.51) \text{ cm}^2$, 比最小值(0 处理)高 288.1%; 主根长度的最大值出现在-15 cm 处理水平, 为 $(106.57 \pm 8.30) \text{ mm}$, 比最小值(0 处理)高出 66.7%; 根体积、根分叉数的最大值和最小值均分别出现在-10 cm 和 0 cm 处理水平; 根尖数分别出现在-10 cm 和-20 cm 处理水平; 根平均直径则分别出现在-5 cm 和-20 cm 处理水平。

2.4 幼苗的形态特征与地下水位的相关性

研究结果表明, 疏花水柏枝幼苗形态特征参数之间均存在相关性(表2)。地上部生物量、株高、茎直径、一级枝数、二级枝数、地下生物量、根表面积、主根长度与根平均直径之间的相关性均达到极显著水平($P < 0.01$); 根体积与根表面积、主根长度的相关性达到极显著水平($P < 0.01$), 根体积与根分叉数的相关性达到显著水平($P < 0.05$), 但该指标与其他形态特征间的相关性不显著($P > 0.05$); 根尖数与株高、二级枝数、地下部生物量、根表面积、主根长度、根平均直径、根分叉数这7个指标的相关性达到极显著水平($P < 0.01$), 根尖数与地上部生物量、茎直径间的相关性达到显著水平($P < 0.05$); 根分叉数与株高、根表面积、主根长度、根平均直径这4个参数的相关性达到极显著水平($P < 0.01$), 且根分叉数与根体积相关性达到显著水平($P < 0.05$)。

疏花水柏枝幼苗的形态指标与地下水位间也具有显著相关性(表2)。其中, 茎平均直径、二级枝数、根表面积、根分叉数与地下水位的相关性达到显著水平($P < 0.05$), 主根长度、根体积与地下水位的相关性达到极显著水平($P < 0.01$)。

2.5 地下水位对幼苗形态指标的主成分分析

疏花水柏枝幼苗形态指标的主成分分析结果显示(表3), 主成分1的贡献率为 50.67%, 主成分2的贡献率为 17.53%, 两者可代表原始信息的 68.20%。其中, 根表面积、根平均直径、地下生物量、一级枝数、茎直径等指标在主成分1上的载荷较高; 根分叉数和根尖数在主成分2上的载荷较高。地下根系与主成分1、主成分2的相关性较

高。整体上幼苗形态指标中, 根系生长发育状况对地下水位的响应更为明显。

进一步对不同地下水位中疏花水柏枝幼苗的生长指标运用主成分分析法进行非约束性排序(图3), 结果显示: 地下水位为 0 cm 处理时, 根表面积在性状症候群(Trait syndrome)中占主要地位(根表面积向量与该地下水位下幼苗的性状症候群的长轴几乎平行, 表明根表面积占主要地位); 地下水位在-5 cm 和-15 cm 处理时, 一级枝数、地下生物量、茎直径在性状症候群中占主要地位; 而在地下水位-10 cm 处理时, 根体积、分叉数、根尖数占主要地位; 当地下水位在-20 cm 处理时, 根体积占主要地位。随着地下水位的降低, 幼苗的性状症候群在主成分轴上朝轴1正方向移动后又向轴1负方向移动, 即幼苗的生长特征均随地下水位的降低呈先增大后减少的趋势。

3 讨论

3.1 疏花水柏枝幼苗地下部的生长状况对地下水位变化的响应

研究发现, 生境地地下水位的变化常引起河岸带植物生长状况的变化^[16]。河岸带植物的生长对地下水位的需求有一个最适范围, 一旦超出这个范围, 其生长便会因水淹或干旱而受到显著影响^[17]。Hanke 等^[18]在研究蛇床子(*Cnidium dubium* (Schkuhr) Thell.)的生长对地下水位变动的响应时, 发现地下水位在-60 ~ -40 cm 间时生长状态最佳, 且植株生长的地下水位与自然栖息地生长旺盛期的地下平均水位十分接近。管博等^[17]也发现合适的地下水位有利于盐地碱蓬(*Suaeda salsa* L.)幼苗根系的生长。河岸带植物对不同地下水位的响应源于地下水位对土壤物理环境的影响^[19]。较高的地下水位会导致土壤被淹没, 植物根系的代谢活动及生长速率因缺氧而受到抑制^[20, 21]。在长期缺氧的条件下, 根系内部会产生乙烯或发生生长调节激素失衡^[22], 根系受损甚至死亡, 从而影响其吸收水分和营养物质的能力^[23]。Imada 等^[24]的研究发现, 银白杨(*Populus alba* L.)在较高的地下水位条件下根系的生长受到了抑制, 根的生长质量较低; 较低的地下水位又会导致土壤干旱, 植物根系的生长因水分缺失而受到影响^[15, 25]。干旱常引起根系的膜系统和渗透调节机制的损伤, 引起植

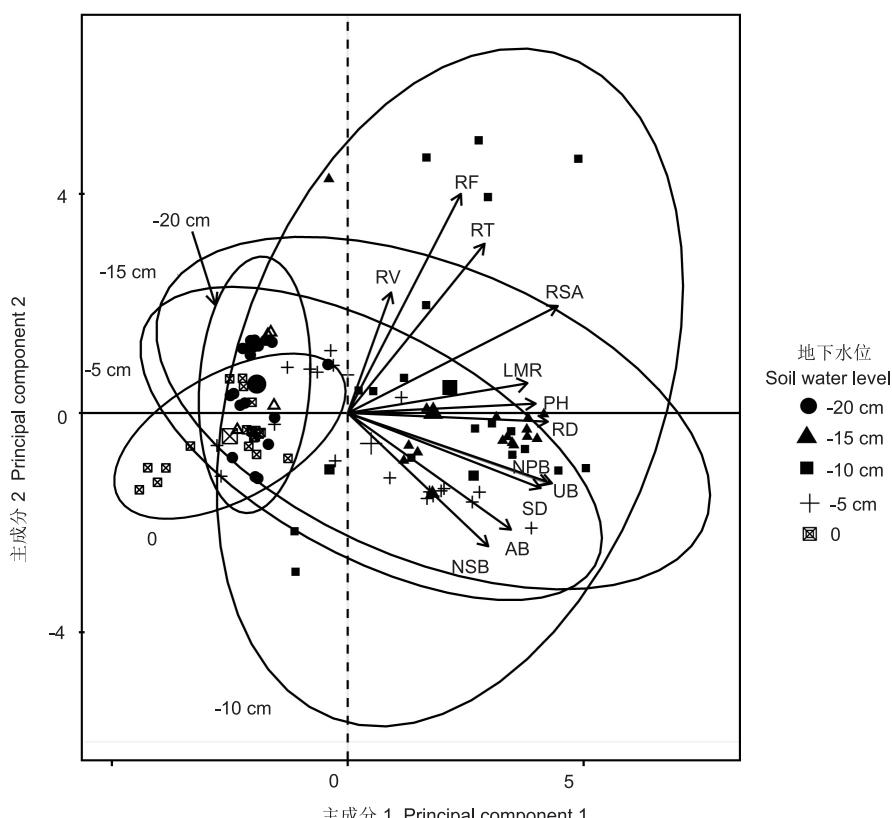
表2 幼苗的形态特征与地下水位的 Pearson 相关性
Table 2 Pearson correlation between morphological characteristics of seedlings and soil water level

指标 Index	地上生物量 Aboveground biomass	茎平均直径 Stem diameter	株高 Plant height	一级枝数 Number of primary branches	二级枝数 Number of secondary branches	地下生物量 Underground biomass	根表面积 Root surface area	主根长度 Length of main root	根体积 Root volume	根平均直径 Root diameter	根尖数 Root tip	根分叉数 Root fork	地下水位 Soil water level
地上生物量 Aboveground biomass	1	0.570 **	0.487 **	0.530 **	0.676 **	0.675 **	0.400 **	0.339 **	-0.047	0.528 **	0.229 *	0.106	0.083
茎平均直径 Stem diameter	1	0.545 **	0.723 **	0.379 **	0.748 **	0.615 **	0.643 **	0.049	0.744 **	0.231 *	0.106	-0.209 *	
株高 Plant height	1		0.589 **	0.536 **	0.609 **	0.646 **	0.535 **	0.022	0.609 **	0.494 **	0.435 **	0.066	
一级枝数 Number of primary branches	1			0.584 **	0.729 **	0.668 **	0.657 **	0.101	0.699 **	0.296 **	0.129	0.065	
二级枝数 Number of secondary branches	1				0.502 **	0.311 **	0.396 **	-0.099	0.373 **	0.188	-0.019	0.197 *	
地下生物量 Underground biomass	1					0.646 **	0.692 **	0.140	0.683 **	0.269 **	0.169	0.122	
根表面积 Root surface area	1						0.655 **	0.329 **	0.761 **	0.686 **	0.701 **	0.212 *	
主根长度 Length of main root	1							0.651 **	0.480 **	0.384 **	0.306 **	0.320 **	
根体积 Root volume								1	0.026	0.103	0.238 *	0.520 **	
根平均直径 Root diameter									1	0.385 **	0.399 **	-0.106	
根尖数 Root tip										1	0.774 **	0.138	
根分叉数 Root fork											1	0.218 *	
地下水位 Soil water level												1	

注: * 表示在 $P < 0.05$ 水平上显著相关, ** 表示在 $P < 0.01$ 水平上极显著相关。
Notes: *, Significant correlation at $P < 0.05$; **, Significant correlation at $P < 0.01$.

表3 主成分分析主轴的组成及贡献率
Table 3 Composition of the principal component analysis spindle and its contribution rate

指标 Index	主成分 1 Principal component 1	主成分 2 Principal component 2
根表面积 Root surface area	0.87	0.40
根直径 Root diameter	0.85	-0.01
地下生物量 Underground biomass	0.84	-0.24
一级枝数 Number of primary branches	0.83	-0.25
茎直径 Stem diameter	0.80	-0.26
株高 Plant height	0.79	0.05
主根长度 Length of main root	0.76	0.10
地上生物量 Aboveground biomass	0.71	-0.40
二级枝数 Number of secondary branches	0.61	-0.46
根分叉数 Root fork	0.47	0.81
根尖数 Root tip	0.57	0.63
根体积 Root volume	0.14	0.41
特征值 Eigenvalues	5.57	1.93
贡献率 Contribution rate(%)	50.67	17.53
累计贡献 Cumulative contribution rate(%)	50.67	68.20



RSA: 根表面积; RD: 根直径; UB: 地下生物量; NPB: 一级枝数; SD: 茎直径; LMR: 主根长度; PH: 株高; AB: 地上生物量; NSB: 二级枝数; RF: 根分叉数; RT: 根尖数; RV: 根体积。
RSA: Root surface area; RD: Root diameter; UB: Underground biomass; NPB: Number of primary branches; SD: Stem diameter; LMR: Length of main root; PH: Plant height; AB: Aboveground biomass; NSB: Number of secondary branches; RF: Root fork; RT: Root tip; RV: Root volume.

图3 地下水位对幼苗生长影响的 PCA 排序
Fig. 3 PCA ordination at different soil water levels

株代谢降低^[26]。Stave 等^[27]发现, 过低的地下水位所造成的水分亏缺对白相思树(*Faidherbia albida* (Delile) A. Chev.)幼苗根系的生长产生了不利影响。本研究中, 地下水位对疏花水柏枝幼苗地下部分的生物量和构件参数均有显著影响, 并因此影响幼苗地下部的生长, 且得出比较适宜于该物种幼苗生长的地下水位为-15 ~ -10 cm。其中地下水位为-15 cm 时, 幼苗的根生物量和主根长度最大, -10 cm 时的根表面积、根体积、根尖数和根分叉数最大。地下水位为 0 和-20 cm 时, 幼苗的根系因水淹和土壤水分亏缺导致生长受到抑制, 其生物量分别比-15 cm 处理时减少 74.1% 和 56.9%, 且他们的根表面积、主根长度、根体积、根尖数和根分叉数均显著低于-10 cm 和-15 cm 两个处理水平。

3.2 疏花水柏枝幼苗地上部生长与形态发生对地下水位变化的响应

已经证实, 地下水位的变化还会影响幼苗地上部的生长与形态发生, 适宜的地下水位范围和土壤含水量有利于植株地上部的生长^[28]。由于植株地上部生长与地下部根系的发育状况呈高度正相关^[25], 当幼苗的地下部生长与形态发生在水淹与干旱条件下受到抑制时, 地上部生长与形态发生也相应地受到了影响^[29]。而当地上部的生长与形态因受到地下部生长的影响时, 其效应又会反馈到地下部, 进一步影响地下部的生长与形态发生^[30]。

本研究中, 疏花水柏枝幼苗地上部的生物量、株高、茎直径、一级枝数、二级枝数与地下部生物量、根表面积、主根长度和根平均直径间的相关性均达到极显著水平, 因此植株地上部生长和形态发生也受到地下部生长的影响。地上部生长和形态发生的适宜地下水位也是-15 ~ -10 cm。其中地下水位为-10 cm 时, 幼苗的地上部生物量和幼苗茎平均直径最高, -15 cm 时幼苗的一级、二级枝数最高。而地下水位在 0 和-20 cm 时, 因处理导致土壤淹没和水分亏缺, 幼苗地上部的生物量和指标均显著低于-10 cm 和-15 cm 两个处理水平。

3.3 疏花水柏枝幼苗生长与地下水位的关系对物种保护的借鉴

植物枝叶和根系性状的改变是植物体复杂的发育协作系统作用的结果, 最终体现为不同的生长策略^[31, 32]。在不同地下水环境下, 幼苗的单个性状

存在差异会导致其性状症候群产生差异^[33]。Bontemps 等^[34]的研究发现, 欧洲山毛榉(*Fagus sylvatica* L.)在经历长期夏季干旱后, 其叶面积和叶干重等性状的改变带来了更为复杂的性状症候群变化。本研究在主成分分析中发现, 主轴 1 中根表面积、根平均直径和地下生物量的贡献率最高, 主轴 2 中根分叉数和根尖数的贡献率最高, 因此地下水位的变化对幼苗地下部生长和形态发生的影响要高于地上部。进一步的主成分分析法的非限制性排序结果显示, 地下水位的变化对幼苗的生长策略有较大影响。并且随着地下水位的降低, 幼苗的性状症候群朝着先增大后减小的方向移动。在地下水位-15 ~ -10 cm 的条件下, 幼苗的生长和器官形成最佳。

河流水位消涨格局的变化所引起的生态环境的变化常常会影响植物的生长发育与种群更新^[7, 8]。González 等^[4]发现河岸带地下水位的变化会使白柳(*Salix alba* L.)和黑杨(*Populus nigra* L.)种群的更新能力受到负面影响, 甚至部分种群消失。本研究发现, 疏花水柏枝残存种群幼苗的生长和形态发生均与地下水位间存在显著相关性。比较适宜于幼苗生长的地下水位为-15 ~ -10 cm。当地下水位超过这个范围后, 特别是当地下水位低于-20 cm 或更低的情况下, 会对幼苗生长产生明显的抑制作用。

三峡-葛洲坝等大型梯级水电站的修建, 改变了疏花水柏枝残存种群生境地水位涨落格局, 加快了水位下降的速度, 总体上降低了其地下水位。长江宜昌段在大坝修建前最小径流发生时间为 1~3 月, 而目前最小径流的发生时间为 12 月至次年 2 月^[9], 且枯水期水位有较大的下降, 幅度达到 1.29 m 左右^[13]。地下水位的快速下降与水位的总体降低显然会对幼苗的生长与形态构建产生抑制作用。本研究仅设计了地下水位为-20 ~ 0 cm 的实验处理, 但在实际情况中地下水位的下降程度和范围远大于该范围, 因此幼苗的生长会受到更为严重的胁迫。由于疏花水柏枝残存种群生境地在 6 月便进入水淹环境, 生长不良的幼苗再经历 3 ~ 4 个月的水淹后, 其幸存的数量会更为稀少。因此, 为了维持濒危物种种群的正常更新, 可适当调整上游大型水电站现有水流调控方案或在生境地周围修建小型堤坝, 减少水位下降的速率和深度, 以保证幼苗

生长与种群更新所需的水生态条件。另外也可以通过人为培育繁殖幼苗, 待次年生境地出露再移栽到群落中, 以增加种群幼苗的数量, 改善种群的年龄结构。

参考文献:

- [1] Hammond DS, Brown VK. Seed size of woody plants in relation to disturbance, dispersal, soil type in wet neotropical forests [J]. *Ecology*, 1995, 76(8): 2544–2561.
- [2] Grzyl A, Marcin K, Katarzyna M, Zielińska, Rewicz A. The relationship between climatic conditions and generative reproduction of a lowland population of *Pulsatilla vernalis*: the last breath of a relict plant or a fluctuating cycle of regeneration? [J]. *Plant Ecol*, 2014, 215(4): 457–466.
- [3] Stella JC, Battles JJ. How do riparian woody seedlings survive seasonal drought? [J]. *Oecologia*, 2010, 164(3): 579–590.
- [4] González E, González-Sanchis M, Comín FA, Muller E. Hydrologic thresholds for riparian forest conservation in a regulated large Mediterranean river [J]. *River Res Appl*, 2012, 28(1): 71–80.
- [5] 陈芳清, 谢宗强, 熊高明, 刘彦明, 杨会英. 三峡濒危植物疏花水柏枝的回归引种和种群重建 [J]. 生态学报, 2004, 25(7): 1811–1817.
Chen FQ, Xie ZQ, Xiong GM, Liu YM, Yang HY. Reintroduction and population reconstruction of an endangered plant *Myricaria laxiflora* in the Three Gorges Reservoir area, China [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2004, 25(7): 1811–1817.
- [6] Nilsson C, Brown RL, Jansson R, Merritt DM. The role of hydrochory in structuring riparian and wetland vegetation [J]. *Biol Rev*, 2010, 85(4): 837–858.
- [7] Campbell D, Keddy PA, Broussard M, Mcfalls-Smith TB. Small changes in flooding have large consequences: experimental data from ten wetland plants [J]. *Wetlands*, 2016, 36(3): 457–466.
- [8] Vivian LM, Godfree RC, Colloff MJ, Mayence CE, Marshall DJ. Wetland plant growth under contrasting water regimes associated with river regulation and drought: implications for environmental water management [J]. *Plant Ecol*, 2014, 215(9): 997–1011.
- [9] 段唯鑫, 郭生练, 王俊. 长江上游大型水库群对宜昌站水文情势影响分析 [J]. 长江流域资源与环境, 2016, 25(1): 120–130.
Duan WX, Guo SL, Wang J. Impact of upper Yangtze River large-scale cascade reservoirs on flow regime at Yichang station [J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2016, 25(1): 120–130.
- [10] Vale VS, Schiavini I, Araújo GM, Gusson AE, Lopes SF, Oliveira AP. Effects of reduced water flow in a riparian forest community: a conservation approach [J]. *J Trop For Sci*, 2015, 27(1): 13–24.
- [11] 王勇, 吴金清, 陶勇, 李作洲, 黄宏文. 三峡库区消涨带特有植物疏花水柏枝 (*Myricaria laxiflora*) 的自然分布及迁地保护研究 [J]. 植物科学学报, 2003, 21(5): 415–422.
Wang Y, Wu JQ, Tao Y, Li ZZ, Huang HW. Natural distribution and ex situ conservation of endemic species *Myricaria laxiflora* in water-level-fluctuation zone within Three-Gorges Reservoir Area of Changjiang River [J]. *Journal of Wuhan Botanical Research*, 2003, 21(5): 415–422.
- [12] 陈芳清, 王传华. 三峡珍稀濒危植物疏花水柏枝的生态保护 [M]. 北京: 科学出版社, 2015.
- [13] 孙昭华, 李义天, 李明, 葛华. 长江中游宜昌–沙市段河床冲淤与枯水位变化 [J]. 水利水运工程学报, 2007(4): 14–20.
Sun ZH, Li YT, Li M, Ge H. Effect of channel degradation on lower level in Yichang-Shashi reach in the Yangtze River [J]. *Hydro-Science and Engineering*, 2007 (4): 14–20.
- [14] 鲍大川, 卢志军, 江明喜, 徐绍东, 姚清, 等. 三峡大坝下游残存疏花水柏枝种群结构和动态 [J]. 植物科学学报, 2010, 28(6): 711–717.
Bao DC, Lu ZJ, Jiang MX, Xu SD, Yao Q, et al. Population structure and dynamics of remnant *Myricaria laxiflora* downstream from the Three Gorges Dam [J]. *Plant Science Journal*, 2010, 28(6): 711–717.
- [15] 邓磊, 关晋宏, 张文辉. 辽东栎幼苗根系形态特征对环境梯度的响应 [J]. 生态学报, 2018, 38(16): 5739–5749.
Deng L, Guan JH, Zhang WH. Responses of root morphological characteristics of *Quercus liaotungensis* seedlings to environmental gradients [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, 38(16): 5739–5749.
- [16] Heerdt GNJT, Veen GFC, Putten WHVD, Bakker J. Effects of temperature, moisture and soil type on seedling emergence and mortality of riparian plant species [J]. *Aquat Bot*, 2016, 136: 82–94.
- [17] 管博, 于君宝, 陆兆华, 张莹, 王雪宏. 黄河三角洲滨海湿地水盐胁迫对盐地碱蓬幼苗生长和抗氧化酶活性的影响 [J]. 环境科学, 2011, 32(8): 2422–2429.
Guan B, Yu JB, Lu ZH, Zhang Y, Wang XH. Effects of water-salt stresses on seedling growth and activities of antioxidative enzyme of *Suaeda salsa* in coastal wetlands of the Yellow River Delta [J]. *Environmental Science*, 2011, 32(8): 2422–2429.
- [18] Hanke JM, Ludewig K, Jensen K. Effects of water level and competition on the endangered river corridor plant *Cnidium dubium* in the context of climate change [J]. *Wetl Ecol Manag*, 2015, 23(2): 215–226.
- [19] Bartholomeus RP, Witte JPM, Bodegom PMV, von Dam http://www.plantscience.cn

- JC, Becker PD, Aerts R. Process-based proxy of oxygen stress surpasses indirect ones in predicting vegetation characteristics[J]. *Ecohydrology*, 2012, 5: 746–758.
- [20] Bartholomeus RP, Witte JPM, Bodegom PMV, von Dam JC, Aerts R. Critical soil conditions for oxygen stress to plant roots: substi process-based model [J]. *J Hydrol*, 2008, 360(1): 147–165.
- [21] Tsukahara H, Kozlowski TT. Effect of flooding and temperature regime on growth and stomatal resistance of *Betula platyphylla* var. *japonica* seedlings [J]. *Plant Soil*, 1986, 92(1): 103–112.
- [22] Loret E, Van VH, Perata P. Plant responses to flooding stress [J]. *Curr Opin Plant Biol*, 2016, 33: 64–71.
- [23] Corley RHV, Tinker PB. Growth, flowering and yield [M]. Corley RHV, Tinker PB, eds. The Oil Palm. 5th ed. Oxford: Wiley Blackwell, 2015.
- [24] Imada S, Yamanaka N, Tamai S. Water table depth affects *Populus alba* fine root growth and whole plant biomass [J]. *Funct Ecol*, 2010, 22(6): 1018–1026.
- [25] 杨振亚, 周本智, 陈庆标, 葛晓改, 王小明, 等. 干旱对杉木幼苗根系构型及非结构性碳水化合物的影响 [J]. 生态学报, 2018, 38(18): 6729–6740.
Yang ZY, Zhou BZ, Chen QB, Ge XG, Wang XM, et al. Effects of drought on root architecture and non-structural carbohydrate of *Cunninghamia lanceolata* [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, 38(18): 6729–6740.
- [26] 王竞红, 张秀梅, 陈艾, 周蕴薇, 陈鹏, 江远芳. 紫穗槐幼苗根系生理特性和解剖结构对PEG-6000模拟干旱的响应 [J]. 生态学报, 2018, 38(2): 511–517.
Wang JH, Zhang XM, Chen A, Zhou YW, Chen P, Jiang YF. Response of physiological characteristics and anatomical structure of roots in *Amorpha fruticosa* seedlings exposed to simulated drought with PEG-6000 [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, 38(2): 511–517.
- [27] Stave J, Oba G, Eriksen AB, Nordal I, Stenseth NC. Seedling growth of *Acacia tortilis* and *Faidherbia albida* in response to simulated groundwater tables [J]. *Forest Ecol Manage*, 2005, 212(1): 367–375.
- [28] Wang D, Yu Z, Peng G, Zhao C, Ding J, Zhang X. Water use strategies of, *Populus euphratica*, seedlings under groundwater fluctuation in the Tarim river basin of central asia [J]. *Catena*, 2018, 166: 89–97.
- [29] Brown CE. A study on waterlogging as a potential tool to control *Ligustrum sinense* populations in western tennessee [J]. *Wetlands*, 2015, 20: 429–437.
- [30] 田媛, 李彦, 唐立松, 范连连. 梭梭幼苗的存活与地上地下生长的关系 [J]. 生态学报, 2014, 34(8): 2012–2019.
Tian Y, Li Y, Tang LS, Fang LL. The survival and above / below ground growth of *Haloxylon ammodendron* seedling [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2014, 34(8): 2012–2019.
- [31] 耿梦娅, 陈芳清, 吕坤, 王玉兵, 向琳, 谢伶莉. 濒危植物长柄双花木 (*Disanthus cercidifolius* var. *longipes*) 叶功能性状随生长发育阶段的变化 [J]. 植物科学学报, 2018, 36(6): 851–858.
Geng MY, Chen FQ, Lü K, Wang YB, Xiang L, Xie LL. Effects of developmental stage on the leaf functional traits of the endangered shrub species *Disanthus cercidifolius* var. *longipes* H. T. Chang [J]. *Plant Science Journal*, 2018, 36(6): 851–858.
- [32] 邬荣领, 胡建军, 韩一凡, 刘红霞. 表型可塑性对木本植物树冠结构与发育的影响 [J]. 林业科学, 2002, 38(4): 141–156.
Wu RL, Hu JJ, Han YF, Liu HX. How phenotypic plasticity affects crown architecture and development in woody plants [J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2002, 38(4): 141–156.
- [33] Florian F, Pablo C, Olivier C, Antoine D, Manuel L, et al. Root functional trait syndromes and plasticity drive the ability of grassland fabaceae to tolerate water and phosphorus shortage [J]. *Environ Exp Bot*, 2015, 110: 62–72.
- [34] Bontemps A, Davi H, Lefèvre F, Rozenberg P, Oddoumuratorio S. Data from: how do functional traits syndromes covary with growth and reproductive performance in a water-stressed population of *Fagus sylvatica*? [J]. *Oikos*, 2017, 126(10): 1472–1483.

(责任编辑: 周媛)