

9种风传杂草种子的扩散能力及传播策略

花奕蕾, 田兴军* (南京大学生命科学院, 江苏南京 210046)

摘要 [目的]研究9种风传杂草种子的扩散能力及传播策略。[方法]以9种杂草种子为试验材料,研究其传播能力(沉降速度、水平移动距离)及其与种子形态结构之间的相关性。[结果]就9种种子整体而言,种子的沉降速度与水平移动距离呈极显著负相关。菊科植物种子的沉降速度与果长、毛长呈正相关,而禾本科植物种子的沉降速度与二者呈负相关;菊科植物种子的水平移动距离与果长、毛长呈负相关,而禾本科植物种子的水平移动距离与二者呈正相关,说明菊科植物和禾本科植物种子的传播策略不同,而这种传播策略往往与植物本身生存环境有关。禾本科植物具有横向传播优势。[结论]该研究可为深入了解种子的传播机制以及杂草的入侵防治提供理论依据。

关键词 种子;沉降速度;水平移动距离;种子结构

中图分类号 S451 **文献标识码** A **文章编号** 0517-6611(2017)15-0021-05

Dispersal Ability and Spread Strategy of Nine Species of Weed Seeds

HUA Yi-lei, TIAN Xing-jun* (School of Life Sciences, Nanjing University, Nanjing, Jiangsu 210046)

Abstract [Objective] To study the dispersal ability and spread strategy of nine species of weed seeds. [Method] Nine species weeds were used as test materials to study the spread abilities (falling speed, horizontal dispersal distance) and their correlation with seed morphological structures. [Result] The falling speed of 9 species of weed seeds had significantly negative correlation with horizontal dispersal distance. The falling speed of Compositae seeds had a positive correlation with fruit length and fur length, while the falling speed of Gramineae seeds had a negative correlation with fruit length and fur length. The horizontal dispersal distance of Compositae seeds had a negative correlation with fruit length and fur length, while that of Gramineae seeds had a positive correlation with fruit length and fur length. These results indicated that the spread strategy of Gramineae seeds and Compositae seeds were different. [Conclusion] The research can provide theoretical basis for understanding the dispersal mechanism of seeds and weed control.

Key words Seed; Falling speed; Horizontal dispersal distance; Seed structure

种子是由胚珠发育而来的器官,但在许多杂草种子的外侧按照其来源往往是子房壁或心皮,因此有些生产上或者平时人们所说的种子实际是果实^[1]。种子(或果实)的结构是自然界长期选择的结果,其附属物(如毛、刺、翅等)可以视为解决其有限能动性的进化方案^[2],目的是为后代的有效传播。为了叙述方便,将包括附属物在内的繁殖体通称为种子。杂草种子的传播途径多样,包括主动传播(如弹射传播)^[3]和倚靠外力(风、水、动物活动的搬运携带等)的传播^[4-6],是杂草得以入侵蔓延的主要原因之一。其中,风媒传播是繁殖体常见的方式^[7],成熟种子具备长距离风传扩散潜力,是物种得以迅速扩散的重要因素^[8-9],种子的风传扩散对于生物地理学和植物群落演替的探索具有重要作用^[10-11]。沉降速率是风力传播能力的一个重要指标,与传播体的形态和重量相关。水平传播距离亦是重要的风力传播特征,能直接反映种子的传播能力^[12]。

菊科植物的种子属于植物学上的连萼瘦果,它们的花萼常变态为冠毛。连萼瘦果将瘦果-冠毛作为一个整体,为该科植物的主要繁殖体和传播器官^[13-14]。部分禾本科种子为颖果,种子的颖片上着生附属毛^[15]。

对草本植物种子风传扩散能力和适应战略研究尚处于起步阶段,目前有对不同种子沉降速度的比较^[10]、菊科植物种子的外部形态和传播能力的关系上研究^[13,16]等,但对于菊科种子以外的带毛风传种子则少有报道,更鲜见关于多科种子间的比较研究。在种子水平传播研究上,多为设置一定高

度和风速的“抛种试验”^[7,12,17],而关于种子落地后的传播潜能研究则鲜见报道。笔者以具有附属毛的9种杂草种子为试验材料,探究其在风的作用下传播能力及其与种子外表结构、生境之间的关系,以期了解这些物种种子的结构特征、风传潜力及其对环境适应策略,为防止杂草入侵蔓延、减轻环境压力提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 样品采集 选用南京地区常见的9种植物种子[菊科的大吴风草(*Farfugium japonicum*)、千里光(*Senecio scandens*)、一枝黄花(*Solidago decurrens*)、钻叶紫菀(*Aster subulatus*)以及禾本科的白茅(*Imperata cylindrica*)、荻(*Triarrhena sacchariflora*)、芦竹(*Arundo donax*)、芦苇(*Phragmites australis*)、蒲苇(*Cortaderia selloana*)]为试验材料,于2015年10—12月采集于南京仙林大学城内。所有样品风干后置于实验室干燥处,挑选形态健康、冠毛完好的样品作为供试种子。

1.2 试验方法

1.2.1 种子形态特征的测量。每种种子分别取30粒,将每粒种子置于直径6 cm的塑料平皿中,从1到30依次编号,使用数显游标卡尺分别测量每粒种子的冠毛长度、瘦果或颖果长度。取每种编号1~10的种子,在解剖镜下计数供试种子的冠毛数量以及中等长度冠毛上的小刺对数,每粒种子测量或计数完成后放回相应编号的平皿。

1.2.2 种子千粒重、毛重/果重。9种种子各取500粒,置于分析天平上称重,重复6次,记录每种种子的500粒重。每种种子随机取30~100粒,将冠毛或附属毛拔离瘦果或颖果,分别称量毛重与果重,计算二者比值,重复6次。

1.2.3 种子降落速度的测定。参照张建等^[16]的方法测定种子沉降速率。准备高度分别为0.5、1.0、1.5、2.0 m,内径

基金项目 江苏省林业三新工程项目(LYSX[2016]46)。
作者简介 花奕蕾(1991—),女,江苏常州人,硕士研究生,研究方向:植物生态。*通讯作者,教授,从事植物生态学研究。
收稿日期 2017-03-22

5 cm的有机玻璃管4根。使玻璃管垂直于地面,形成无横向气流影响的半包围透明环境。管口下端放置黑色卡纸,颜色反差,便于观察并回收种子(图1)。依次取每种植物的1~30号种子,用镊子轻夹种子置于管顶中部,然后松开使种子在管内自由落下,用秒表记录种子开始下降至落地的时间。由同一个人同时负责种子掉落操作和时间记录,每个高度每粒种子重复3次,取3次平均值。

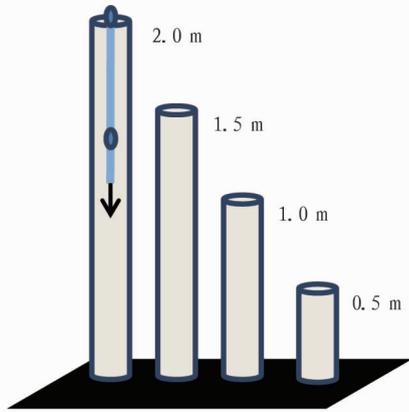


图1 种子沉降速度测定装置示意

Fig. 1 The measurement device for falling speed of seeds

1.2.4 种子水平移动距离的测定。将1.5 m长的有机玻璃管固定于桌面,于玻璃管口设置风速为0.46 m/s的瞬时风力(图2)。取每种植物的1~30号种子,每粒种子依次以“毛迎风”“果迎风”“侧面迎风”3个方向分别放置于管口接受相同风力作用,每种摆放方向重复2次,当种子静止后测量种子位置到原始位置的距离,每粒种子对应6个距离值,

取其平均值。

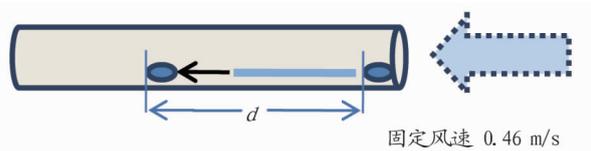


图2 种子水平移动距离测定装置示意

Fig. 2 The measurement device for horizontal dispersal distance of seeds

1.2.5 数据统计与分析。使用Excel 2007软件和SPSS 19.0统计软件对试验数据进行统计与分析。根据不同高度下种子沉降时间,使用线性回归分析分别计算出各种种子对应的沉降速率以及每粒种子对应的沉降速率。使用Tukey多重比较分析不同高度下各种子的下落时间。使用Spearman相关性分析研究传播能力(沉降速度、水平移动距离)与种子结构之间的相关性。试验结果均以平均值±标准差表示。

2 结果与分析

2.1 形态特征 4种菊科植物种子冠毛呈伞状分布于种子顶端,毛上有小刺;5种禾本科植物种子附属毛分布不规则,截面圆形,毛上光滑无小刺。由表1可知,大吴风草的千粒重最大(3.14 g),而一枝黄花和针叶紫苑的千粒重较小,仅为0.05 g;白茅的毛重/果重最大(1.32),而钻叶紫苑的毛重/果重最小。芦苇的果长最长(14.66 mm),而一枝黄花的果长最短(1.11 mm);白茅的毛长最长(12.14 mm),而一枝黄花的毛长最短(2.82 mm);荻的毛数最多(157.80),而一枝黄花的毛数最少(27.20);大吴风草的小刺对数最多,达56.30。

表1 9种杂草种子形态性状测量结果

Table 1 Morphological characteristics of 9 species of weed seeds

品种 Species	千粒重 1 000-gain weigh//g	毛重/果重 Fur weight/ fruit weight	果长 Fruit length//mm	毛长 Fur length mm	毛数 Fur number	小刺对数 Number of gemed thorn
大吴风草 <i>F. japonicum</i>	3.14 ± 0.48	0.24 ± 0.04	6.63 ± 0.70	8.68 ± 1.08	120.90 ± 5.53	56.30 ± 5.27
一枝黄花 <i>S. decurrens</i>	0.05 ± 0.01	0.37 ± 0.13	1.11 ± 0.21	2.82 ± 0.28	27.20 ± 4.10	23.80 ± 3.52
千里光 <i>S. scandens</i>	0.23 ± 0.01	1.28 ± 0.16	2.98 ± 0.28	7.14 ± 0.69	85.90 ± 8.47	48.00 ± 7.50
钻叶紫苑 <i>A. subulatus</i>	0.05 ± 0.00	0.16 ± 0.08	1.57 ± 0.38	3.10 ± 0.37	38.10 ± 3.25	37.60 ± 5.99
白茅 <i>I. cylindrica</i>	0.14 ± 0.03	1.32 ± 0.18	3.26 ± 0.28	12.14 ± 1.28	109.15 ± 10.54	—
荻 <i>T. sacchariflora</i>	0.31 ± 0.03	0.83 ± 0.09	5.63 ± 0.47	11.46 ± 1.04	157.80 ± 17.52	—
芦苇 <i>P. australis</i>	0.24 ± 0.02	0.50 ± 0.09	14.66 ± 2.17	9.27 ± 0.90	148.30 ± 26.55	—
芦竹 <i>A. donax</i>	0.44 ± 0.01	0.32 ± 0.01	10.24 ± 1.51	6.83 ± 0.90	136.10 ± 20.34	—
蒲葦 <i>C. selloana</i>	0.10 ± 0.00	0.42 ± 0.10	12.81 ± 1.77	7.37 ± 1.06	61.50 ± 5.62	—

2.2 种子沉降速率 由表2可知,回归分析中 R^2 值较大,说明回归直线拟合较好。由表3可知,无论在何种高度下,除芦竹下落时间较短之外,禾本科的其他4种种子的下落时间均比菊科植物长,即菊科植物的下降速率总体较高,禾本科植物的下降速率较低。随着下落高度的升高,每种种子的下落时间标准差增加,即种内个体间的下落时间差异逐渐加大。

2.3 水平移动距离 当固定瞬时风速为0.46 m/s时,不同种子的水平移动距离为2.10~61.66 cm,各品种的水平移动距离从大到小依次为芦苇[(61.66 ± 12.93) cm]、蒲葦[(49.15 ± 10.26) cm]、白茅[(43.56 ± 10.56) cm]、荻

[(38.27 ± 11.32) cm]、千里光[(36.50 ± 13.97) cm]、芦竹[(29.60 ± 0.22) cm]、钻叶紫苑[(13.62 ± 10.30) cm]、一枝黄花[(11.85 ± 5.32) cm]、大吴风草[(2.10 ± 1.24) cm]。在4种菊科植物中,水平移动距离的平均值越大,其标准差越大;在禾本科植物中,水平移动距离的最大值和最小值依次对应最大标准差和最小标准差,即水平移动距离越大的种子,其种内个体的移动距离越不稳定。

2.4 种子传播的特征

2.4.1 沉降速度和水平移动距离。将种子的沉降速度和水平移动距离之间进行Spearman相关性分析发现,除白茅以外,其他种子的沉降速度与水平移动距离皆存在显著相关,

表 2 9 种杂草种子沉降速度回归统计值

Table 2 Regression analysis of the falling speed of 9 species of weed seeds

品种 Species	沉降速度 Falling speed cm/s	R ²
大吴风草 <i>F. japonicum</i>	68.33	0.923
一枝黄花 <i>S. decurrens</i>	14.71	0.927
千里光 <i>S. scandens</i>	17.95	0.958
钻叶紫菀 <i>A. subulatus</i>	15.57	0.759
白茅 <i>I. cylindrica</i>	14.54	0.975
荻 <i>T. sacchariflora</i>	14.36	0.928
芦苇 <i>P. australis</i>	10.28	0.946
芦竹 <i>A. donax</i>	28.52	0.958
蒲苇 <i>C. selloana</i>	12.28	0.980

其中芦竹和蒲苇的沉降速度与水平移动距离呈显著负相关,大吴风草、一枝黄花、千里光、钻叶紫菀、荻和芦苇的沉降速度与水平移动距离呈极显著负相关。将数据组以整体、禾本科、菊科为单位进行分析,沉降速度与水平移动距离之间皆存在极显著负相关。这表明沉降速率越小的种子,其在固定风速下水平传播距离越远。

2.4.2 传播能力与种子重量、结构数据的关系。由表 4 可知,9 种植物整体的沉降速度与毛长呈极显著负相关;菊科植物的沉降速度与种长、种重、毛长、毛数、小刺对数皆呈极显著正相关;禾本科植物中沉降速度与种长、毛长呈极显著负相关。9 种种子的水平移动距离与种长、毛长、毛数呈极显著正相关;菊科植物的水平移动距离与种长呈极显著负相关,与毛长呈显著负相关;禾本科植物的水平移动距离与种长呈极显著正相关,与毛长呈显著正相关。

表 3 不同释放高度的 9 种杂草种子平均下落时间

Table 3 Sinking time of 9 species of weed seeds at different release height

品种 Species	释放高度 Release height // cm			
	50	100	150	200
大吴风草 <i>F. japonicum</i>	0.54 ± 0.14 a	1.29 ± 0.35 a	1.99 ± 0.55 a	2.79 ± 0.84 a
芦竹 <i>A. donax</i>	1.27 ± 0.20 b	3.33 ± 0.70 b	5.19 ± 1.09 b	6.72 ± 1.40 b
钻叶紫菀 <i>A. subulatus</i>	2.31 ± 1.38 c	4.82 ± 2.71 c	7.43 ± 4.31 c	9.74 ± 5.54 c
千里光 <i>S. scandens</i>	2.67 ± 0.59 cd	5.22 ± 1.19 c	7.98 ± 1.69 cd	10.74 ± 2.27 cd
一枝黄花 <i>S. decurrens</i>	2.53 ± 0.80 c	5.22 ± 1.64 c	9.73 ± 2.60 d	13.09 ± 3.52 def
荻 <i>T. sacchariflora</i>	3.22 ± 0.87 de	6.64 ± 1.74 d	9.76 ± 2.77 d	12.79 ± 3.71 de
白茅 <i>I. cylindrica</i>	3.37 ± 0.61 ef	6.67 ± 1.15 d	9.69 ± 1.74 d	13.50 ± 2.08 ef
蒲苇 <i>C. selloana</i>	4.01 ± 0.53 fg	8.21 ± 1.15 e	12.44 ± 1.57 e	15.51 ± 2.30 f
芦苇 <i>C. selloana</i>	4.39 ± 1.11 g	9.01 ± 2.18 e	13.71 ± 3.33 e	18.63 ± 4.52 g

注:同列不同小写字母表示显著差异($P < 0.05$)

Note: Different small letters in the same column indicate significant difference ($P < 0.05$)

分析毛重/果重、种重/毛数、种重/毛长、种重/(毛长 × 毛数)与种子沉降速度、水平移动距离之间的关系,发现 9 种种子的沉降速度与种重/(毛长 × 毛数)呈极显著正相关,9

种种子的水平移动距离及 4 种菊科种子的水平移动距离分别与种重/(毛长 × 毛数)呈极显著负相关(表 4)。

表 4 种子的沉降速度、水平移动距离与结构特征之间的相关系数

Table 4 The correlation coefficients between seed structure characteristics and falling speed, horizontal dispersal of seeds

指标 Index	沉降速度 Falling speed			水平移动距离 Horizontal dispersal distance		
	9 种植物 Average values of 9 species of weeds	4 种菊科 Average values of 4 species of Compositae seeds	5 种禾本科 Average values of 5 species of Gramineae seeds	9 种植物 Average values of 9 species of weeds	4 种菊科 Average values of 4 species of Compositae seeds	5 种禾本科 Average values of 5 species of Gramineae seeds
种长 Seed length	-0.116	0.738 **	-0.284 **	0.473 **	-0.356 **	0.368 **
种重 Seed weight	0.350	1.000 **	0.500	-0.500	-0.200	-0.700
毛长 Fur length	-0.160 **	0.600 **	-0.226 **	0.453 **	-0.226 *	0.204 *
毛数 Fur number	-0.031	0.639 **	0.056	0.308 **	-0.257	-0.139
小刺对数 Number of gemed thorn	—	0.633 **	—	—	-0.280	—
毛重/果重 Fur weight/fruit weight	-0.467	0.000	-0.100	0.650	0.400	0.200
种重/毛数 Seed weight/fur number	0.650	0.800	0.400	-0.517	-0.400	-0.700
种重/毛长 Seed weight/fur length	0.633	0.800	0.300	-0.467	-0.400	-0.600
种重/(毛长 × 毛数) Seed weight/(fur length × fur number)	0.733 **	0.200	0.100	-0.850 **	-1.000 **	-0.200

注: * 表示相关性达到显著水平($P < 0.05$); ** 表示相关性达到极显著水平($P < 0.01$)

Note: * indicates significant correlation ($P < 0.05$); ** indicates extremely significant correlation ($P < 0.01$)

3 结论与讨论

3.1 9 种植物种子的传播能力 该试验结果表明个体间沉降速度的离散程度随着高度增加而逐渐变大,说明种子自身

特点对于沉降速度的影响随着下落高度的增加逐渐显现,此结果与张建等^[16]和许留兴等^[18]研究结果相同,即种子在空中停留时间越长,个体差异越显著,标准差越大,离散程度越

大。在低空条件下,种子的冠毛和质量等宏观特征对散落距离的影响不明显,伴随着高度的增加,冠毛和质量等因素对于滞空时间延长和飞行距离增加的影响更加凸显。

9种种子的水平地面传播能力与果长、毛长以及毛数都呈极显著正相关,而在垂直降落中仅与毛长相关,且相关系数较小,据此可推测当种子在水平地面上传播时(即自身重量影响减小时),毛长和毛数对传播的辅助影响效果增大。这也是植物适应环境及自身需求的表现。

9种杂草种子的沉降速度越小(越容易漂浮于空中),受到瞬时恒定风力后在水平地面的传播距离相应越远。据此推测,在自然条件下,大部分具有附属毛的风传种子,无论是漂浮于空中或是已经落地,都有横向飘动传播的可能,且下落速度越缓慢的种子,其横向传播潜力相应越强。该研究结果与 Schulz 等^[19]的研究结果相一致,即相同条件下种子在空中漂浮时间越长传播距离越远。

3.2 传播能力与毛重/果重、种重/(毛长×毛数)的关系 毛重/果重与沉降速率、水平移动距离不存在相关性,说明种子传播能力不能单从质量分配考虑,其结构是影响种子水平传播的重要因素,如毛长、毛数等。

种重/(毛长×毛数)即种子的重量与毛长和毛数的乘积比值,表示单位毛长上所承受的种子重量。9种种子的沉降速度与单位毛长上承受的重量呈极显著正相关,说明9种植物每根冠毛或附属毛负担的重量越大,种子沉降速率越大。若假设种子冠毛或附属毛的宽度一致,即可理解为单位面积的冠毛上承受的负担越大,种子沉降速度越大。

在固定风速下,9种种子的水平移动距离分别与单位毛长上承受的重量呈极显著负相关,其中菊科植物表现得更为明显,即每根冠毛或附属毛负担的阻力(此处仅考虑种重引起的摩擦力)越小,移动的距离越远。禾本科植物种子的水平移动距离与种重/(毛长×毛数)不存在相关性,有可能禾本科种子的附属毛分布不如菊科的冠毛分布有规律,附属毛与颖果夹角大小不一,部分附属毛作用不大,导致承受种子阻力和风力的附属毛数量与参与计算的附属毛数量不符。

3.3 菊科种子的沉降速度、水平移动距离与结构的相关性 菊科种子的沉降速度和结构特性(种长、毛长、毛数、小刺对数)呈极显著正相关,而郝建华等^[13]试验结果表明,冠毛数量与沉降速度呈负相关,冠毛长度和小刺对数与沉降速度之间均呈极显著负相关;张建等^[16]报道,菊科种子沉降速度与种长、种宽、小刺数呈极显著正相关,与毛长和数量均无相关性。该试验结果与郝建华等^[13]和张建等^[16]研究结果不同,可见所用菊科种子种类不同、形态不同,导致结构数据对传播效果影响程度不同,种子个体的饱满程度、成熟度及水分、冠毛张角等差异也可能影响整体试验结果。

该试验结果表明菊科植物种子的水平移动距离与种长呈极显著负相关,与毛长呈显著负相关,与其余结构因素不相关。郝建华等^[13]报道菊科植物种子的水平扩散距离与冠毛的长度呈显著正相关,与该试验结果恰恰相反,其原因可能在于研究方法是测量种子在水平面上受风力影响后移动

距离,而郝建华等^[13]的研究方法是将种子在一定高度受风后释放。该试验结果表明,越长的冠毛对应于越长的瘦果长度($r=0.880, P<0.001$),可能对应于越大的瘦果质量,即冠毛越长,可能受到的水平面摩擦力越大。在横向传播过程中,冠毛、瘦果与空气间的摩擦力小于与水平面接触的摩擦力。郝建华等^[13]研究结果表明,冠毛长度对于种子横向传播更具辅助功能。

3.4 禾本科和菊科种子的传播能力与结构特征比较 在菊科和禾本科植物进行比较时发现,2科植物种子的传播能力与结构之间相关关系存在差异。对4种菊科植物种子而言,各形态特征的值越大,使其沉降速率增加,水平受风后的移动距离减少;对5种禾本科植物种子而言,形态特征值的上升使得其漂浮能力加大,横向受风后的移动距离也加大。在不同种植物种内分析中,结构与传播能力的相关性更为多变。由此可见,不同植物科属、物种间的种子传播能力及相应的影响因素和影响程度存在差异。分析种间的结构与传播能力的相关性发现,同一特征对于不同种子的传播能力的贡献程度不同,该试验结果与潘燕等^[12]的研究结果相一致。钻叶紫菀的冠毛与沉降速度呈正相关($r=0.446, P<0.05$),而大吴风草的冠毛与沉降速度呈负相关($r=-0.693, P<0.05$)。

禾本科植物种子在水平移动距离上普遍大于菊科植物种子。这可能与菊科植物和禾本科植物的种子结构有关,二者种子形态相似又不尽相同,以钻叶紫菀、蒲葦为例,菊科植物种子多为伞状,冠毛排列较为整齐且有明显的圆面或圆锥面结构,毛的质地较硬,伸展平直,且毛上有小刺。瘦果表面凹凸不平或有小刺,仅一端与冠毛相连;禾本科植物带附属毛种子,其附属毛质地柔软易变形,无小刺,伸展向各个方向,附属毛基本包围颖果。颖果多呈纺锤形,有些颖果拖有长尾(如蒲葦、芦葦),表面较菊科瘦果无刺,相对光滑。

就水平移动而言,由于菊科植物部分种子降落到地面时,冠毛与瘦果同时接触平面,种子冠毛和瘦果质地皆较硬且上有小刺,与接触地较大,阻碍横向传播;另外,其形状为固定伞形,若侧面迎风则不易受力,需转向以使冠毛面受力,存在耗能。禾本科植物种子附属毛包裹颖果,颖果除个别有细长尾部着地外,几乎不与地面接触,附属毛柔软无小刺,与管壁摩擦较小。另禾本科附属毛伸展方向不规则,有时近乎球状,任意迎风面均可受力,在水平面上几乎为滚动,甚至略为飘离管壁的移动。这也解释该试验中禾本科种子在水平移动距离上普遍占优势的现象。

就9种植物种子而言,除千里光和一枝黄花外,大吴风草、芦葦、芦竹3种种子中沉降速度最大的物种对应该科最小的水平移动距离;沉降速度最小则对应该科最大的移动距离。

3.5 禾本科与菊科种子传播能力及传播策略 禾本科植物生境多为河岸、海滩、池沼、道旁湿润处等水分充足地带,菊科植物生境则多为路边荒野、山坡、草地^[20]等较干燥的陆地,因此其传播策略是不同的。

种子若在自然环境中掉落,菊科大多稳定、较迅速地掉落在母体附近,且瘦果着陆,可开始萌发生长。虽然自身水平传播能力较差,但可利用冠毛及瘦果上小刺依附动物传播,一定程度上扩展生长范围。同一高度下禾本科种子掉落过程时间较长,期间有更多机会横向传播;即使落于地表,也可能是附属毛着陆,行动相对自由。若着陆环境有降雨或有水体,则附属毛湿润后粘连,支撑结构被破坏,颖果可着地萌发生长。若地表较为干燥,禾本科种子在风力较强时更易滚动传播,甚至二次飘行,直至落在适宜湿润地带。

对于本已生长于水分充足地带的禾本科种子,可能第 1 次降落地点即为水面。由于其附属毛的全方位生长,接触空气面的附属毛仍可挺立,起到“船帆”的作用,在风力及水波推动下漂浮停靠在岸边,使种子萌发于湿润且土壤肥沃区域。

该试验仅研究了水平方向风力,而在自然中还有气体湍流^[21]、地形因子、气候、上升气流^[6]等对种子风传的影响,可通过制造风洞进行环境模拟^[22],作为后续试验研究方向之一。

参考文献

- [1] 李儒海,强胜. 杂草种子传播研究进展[J]. 生态学报,2007,27(12): 5361-5370.
- [2] GREENE D F, JOHNSON E A. Seed mass and dispersal capacity in wind-dispersed diaspores[J]. *Oikos*,1993,67(1):69-74.
- [3] 张自生,文慧慧,张仕林,等. 酢浆草种子弹力传播机制初探[J]. 植物学研究,2014,3(5): 200-206.
- [4] WILL H, MAUSSNER S, TACKENBERG O. Experimental studies of diaspore attachment to animal coats: Predicting epizoochorous dispersal potential[J]. *Oecologia*,2007,153(2):331-339.
- [5] HUGHES L, WESTOBY M. Effect of diaspore characteristics on removal of seeds adapted for dispersal by ants[J]. *Ecology*,1992,73(4):1300-1312.

(上接第 20 页)

GR)活性受到盐胁迫环境的抑制较明显。除了 APX 和 GR,其他 3 种酶类活性在 25 mmol/L 的盐胁迫条件下,与对照组相比显著降低,而 APX 和 GR 活性在盐浓度 ≥ 50 mmol/L 的环境中才比对照组显著降低。

综上所述,虽然陇春 27 号和陇春 30 号大部分抗氧化酶类活性对盐胁迫的响应十分敏感,但是从发芽率的表现上来看,陇春 27 号和陇春 30 号小麦种子都对低盐浓度表现出一定的耐受性,这可能是由于除了抗氧化酶类,小麦种子中其他能够抵抗盐胁迫的调节物在抗盐过程中起到了更加主动的调节作用(比如可溶性糖、脯氨酸等渗透性调节物)。高盐胁迫条件下,抗氧化酶类活性快速降低,造成种子中积累的 ROS 无法及时清理,这种次生胁迫对种子的正常萌发造成了一定的影响,在低盐浓度下表现为发芽速度降低,高盐浓度下就表现为发芽率和发芽势的全面被抑制,对小麦的后续生长十分不利,因此在种植过程中,保证土壤中合理的 NaCl 浓度(一般不应大于 50 mmol/L)对小麦种子的萌发和正常生长有着十分重要的作用。

- [6] TACKENBERG O, POSCHLOD P, KAHMEN S. Dandelion seed dispersal: The horizontal wind speed does not matter for long-distance dispersal-It is Updraft! [J]. *Plant biology*,2003,5(5): 452-454.
- [7] 朱葛晓龙,朱敏,季璐,等. 入侵杂草小飞蓬和钻形紫菀种子风传扩散生物学特性研究[J]. 农业环境科学学报,2011,30(10): 1978-1984.
- [8] 郑景明,桑卫国,马克平. 种子的长距离风传播模型研究进展[J]. 植物生态学报,2004,28(3): 414-425.
- [9] 张海亮,朱敏,李干金. 影响加拿大一枝黄花种子非随机脱落的因素[J]. 植物生态学报,2015,39(3): 258-263.
- [10] 郭强,朱敏,徐勤,等. 五种杂草种子沉降速度[J]. 生态学杂志,2008,27(4): 519-523.
- [11] 王学进,李鑫,戴梅. 一种测量风传种子沉降速度系统的设计与实现[J]. 常熟理工学院学报,2014,28(4):95-99.
- [12] 潘燕,王帅,王崇云,等. 云南松与云南油杉种子风力传播特征比较[J]. 植物分类与资源学报,2014,36(3): 403-410.
- [13] 郝建华,强胜,杜康宁,等. 十种菊科外来入侵种连萼瘦果风力传播的特性[J]. 植物生态学报,2010,34(8):957-965.
- [14] 朱金雷,刘志民. 种子传播生物学主要术语和概念[J]. 生态学杂志,2012,31(9):2397-2403.
- [15] 关广清,张玉茹,孙国友,等. 杂草种子图鉴[M]. 北京:科学出版社,2000:300.
- [16] 张建,周存宇,费永俊. 6 种蒲公英种子扩散能力研究[J]. 种子,2014,33(7): 70-72.
- [17] 王崇云,潘燕,朱晓媛,等. 紫茎泽兰在弃耕地上的种子风传播与种群建立特征[J]. 杂草科学,2015,33(3):1-5.
- [18] 许留兴,张锦华,叶红环,等. 紫茎泽兰种子沉降特征研究[J]. 草地学报,2016,24(3):693-698.
- [19] SCHULZ B, DÖRING J, GOTTSBERGER G. Apparatus for measuring the fall velocity of anemochorous diaspores with results from two plant communities[J]. *Oecologia*,1991,86(3): 454-456.
- [20] 江苏省植物研究所. 江苏植物志[M]. 南京:江苏人民出版社,1977:182-183.
- [21] JONGEJANS E, PEDATELLA N M, SHEA K, et al. Seed release by invasive thistles: The impact of plant and environmental factors[J]. *Proceedings of the royal society B*,2007,274(1624):2457-2464.
- [22] 刘明虎,朱金雷,辛智鸣,等. 用于研究种子风力传播的野外环境风洞[J]. 生态学杂志,2015,34(6): 1770-1778.

参考文献

- [1] 熊建林. 盐胁迫对不同种源地燕麦种子萌发的影响研究[J]. 安徽农学通报,2015,21(20):21-23.
- [2] 张超强,杨颖丽,王莱,等. 盐胁迫对小麦幼苗叶片 H₂O₂ 产生和抗氧化酶活性的影响[J]. 西北师范大学学报(自然科学版),2007,43(1):71-75.
- [3] 贺岩,李志岗,陈云昭,等. 外源脯氨酸对盐胁迫下大豆离体胚再生植株生理特征及线粒体结构的影响[J]. 大豆科学,2000,19(4):314-319.
- [4] 齐志广,黄占景,沈银柱. 盐胁迫对小麦耐盐突变体苗期超氧化物歧化酶活性的影响[J]. 河北师范大学学报(自然科学版),2002,26(4):406-409.
- [5] 梁超,王超,杨秀风,等. ‘德抗 961’小麦耐盐生理特性研究[J]. 西北植物学报,2006,26(10):2075-2082.
- [6] AEBI H. Catalase in vitro[J]. *Methods Enzymol*,1984,105:121-126.
- [7] 李合生. 植物生理生化实验原理和技术[M]. 北京:高等教育出版社,2000.
- [8] RAO M V, PALIYATH G, ORMROD D P. Ultraviolet-B and ozone-induced biochemical changes in antioxidant enzymes of *Arabidopsis thaliana* [J]. *Plant physiology*,1996,110(1):125-136.
- [9] NAKANO Y, ASADA K. Hydrogen peroxide is scavenged by ascorbate-specific peroxidase in spinach chloroplasts[J]. *Plant and cell physiology*,1981,22(5):867-880.
- [10] 金梦阳,危文亮. ⁶⁰Co γ 射线辐照对连续子保护酶活性的影响[J]. 核农学报,2008,22(5):569-572.