

陕北黄土丘陵沟壑区坡沟立地环境下幼苗的存活特征

苏 媛¹ 焦菊英^{1,2*} 王志杰²

¹西北农林科技大学水土保持研究所, 陕西杨凌 712100; ²中国科学院水利部水土保持研究所, 陕西杨凌 712100

摘 要 幼苗是植被恢复演替的基础, 在生态系统中具有非常重要的作用。为了探索黄土丘陵沟壑区坡沟立地环境下幼苗的存活特征, 在陕西省安塞县宋家沟和纸坊沟流域设置15个固定样地进行定点动态监测, 运用单因素方差分析法和系统聚类分析法对不同立地环境下的幼苗密度和幼苗存活率进行了分析。结果表明: 1)不同坡沟立地环境下, 幼苗存活特征差异明显, 整体表现为阳坡幼苗密度较小而存活率较高, 阴坡幼苗密度较大但存活率较低。2)细裂叶莲蒿(*Artemisia gmelinii*)、菊叶委陵菜(*Potentilla tanacetifolia*)、阿尔泰狗娃花(*Heteropappus altaicus*)等物种具有较高的幼苗存活率, 在生存竞争中幼苗是以“质”取胜; 而猪毛蒿(*Artemisia scoparia*)、中华苦苣菜(*Ixeris chinensis*)、阴行草(*Siphonostegia chinensis*)等物种具有较高的幼苗密度, 在生存竞争中是以“量”取胜。3)同一物种在坡沟立地环境下表现出不同的存活曲线, 不同物种在不同立地环境下也可呈现同一存活曲线; 细裂叶莲蒿、菊叶委陵菜、长芒草(*Stipa bungeana*)、阿尔泰狗娃花、兴安胡枝子(*Lespedeza davurica*)等物种, 幼苗不仅在雨季存活能力强且具有较强的越冬能力; 猪毛蒿、香青兰(*Dracocephalum moldavica*)、臭蒿(*Artemisia hedinii*)等物种在雨季前幼苗存活能力较强, 但冬季存活能力弱。4)坡面不同微环境下幼苗存活特征也存在差异, 即微环境的改变在一定程度上影响着幼苗的生长、存活和越冬。因此, 在黄土丘陵沟壑区应根据物种幼苗存活特性对幼苗进行适当的抚育管理, 这将有利于幼苗的建植和植被更新。

关键词 立地环境, 微环境, 幼苗存活曲线, 幼苗存活率, 黄土丘陵沟壑区

Characteristics of seedling survival in habitats of hill and gully slopes in hill-gully Loess Plateau region of northern Shaanxi

SU Yuan¹, JIAO Ju-Ying^{1,2*}, and WANG Zhi-Jie²

¹Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A & F University, Yangling, Shaanxi 712100, China; and ²Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100, China

Abstract

Aims Seedling is the fundament of vegetation restoration succession and plays a very important role in ecosystems. The objective of this paper was to explore the characteristics of seedling survival in habitats of hill and gully slopes in a hill-gully Loess Plateau region.

Methods Fifteen permanent plots in Zhifanggou and Songjiagou watershed in Ansai County were established for sentinel dynamic monitoring, and one-way ANOVA and hierarchical cluster analysis were used to analyze seedling density and survival rate in different habitats.

Important findings There were significant differences in the characteristics of seedling survival among different habitats, with smaller seedling density and higher survival rates observed on the sunny slopes and larger seedling density but lower survival rate found on the shady slopes. In competition for survival, *Artemisia gmelinii*, *Potentilla tanacetifolia*, and *Heteropappus altaicus* etc. took advantage of quality and were characterized by a higher seedling survival rate, while *Artemisia scoparia*, *Ixeris chinensis*, *Siphonostegia chinensis* etc. adopted a strategy of “quantity” and characterized by a higher seedling density. The same species in different habitats had different survival curves, and the same survival curves in different habitats applied to different species. The seedlings of *Artemisia gmelinii*, *Potentilla tanacetifolia*, *Stipa bungeana*, *Heteropappus altaicus*, and *Lespedeza davurica* etc. had a strong survival capability in the rainy season and were easy to overwinter successfully, whereas the seedling survival capability in *Artemisia scoparia*, *Dracocephalum moldavica*, and *Artemisia hedinii* etc. was strong prior

收稿日期Received: 2014-02-17 接受日期Accepted: 2014-04-10

* 通讯作者Author for correspondence (E-mail: jyjiao@ms.iswc.ac.cn)

to the rainy season but weak in winter. The characteristics of seedling survival in different micro-environments also differed. A change in micro-environment affected seedling growth, survival, and overwintering to some extent. Thus, a proper tending for seedlings according to the survival characteristics of species is conducive to the seedling establishment and vegetation succession in the hill-gully Loess Plateau region.

Key word habitats, micro-environments, seedling survival curves, seedling survival rate, hill-gully region of Loess Plateau

种子萌发、幼苗生长, 以及成熟植株的存活、开花、结实是构成植物生活史的3个主要过程(Wilbur, 1976)。从种子到幼苗阶段是植物种群生活史中亏损最严重的时期, 也是植物更新过程中的薄弱环节(武高林和杜国祯, 2008)。幼苗通过不断更新影响植物种群的扩大、扩散和延续(武高林等, 2006), 甚至会影响未来植物群落的组成、结构、分布与更新(Garcia-Serrano *et al.*, 2004; 程积民等, 2006)。幼苗存活建植是幼苗更新及植物群落更新过程中的关键环节, 对外界环境条件反应最为敏感(Jalili *et al.*, 2003)。萌发出土的幼苗必须与外界环境不断地抗争, 只有具有较强环境适应能力的幼苗才能存活, 并生长发育为成年植株。可见, 幼苗是植被恢复的基础, 其建植(存活)成功与否直接关系到未来植被群落的更新。

幼苗与种子特性的关系(Seiwa, 2000; Chidumayo, 2013)、幼苗更新特征(Li *et al.*, 2005; 康冰等, 2012)、幼苗补充与建植(高贤明等, 2003; Tara & Daniel, 2004; Albrecht & McCarthy, 2009; 尹华军等, 2011), 以及幼苗存活影响因素(Marushia & Holt, 2008; Liu *et al.*, 2011; Bryndis *et al.*, 2013; Jia *et al.*, 2013; Song *et al.*, 2013; Castro-Morales *et al.*, 2014)等, 一直以来是国内外研究的热点问题。幼苗存活动态方面的研究相对薄弱。Maestre等(2003)曾报告, 在西班牙东南部半干旱草原的灌木*Pistacia lentiscus*幼苗随时间进程死亡率不断增大, 出苗3年之后仅有36%的幼苗存活; 郭华等(2010)在黄土高原子午岭也发现, 在郁闭的森林生境中, 辽东栎(*Quercus wutaishanica*)幼苗数量随着时间进程有持续降低的趋势; Takashi等(2005)则指出, 在日本北部温带森林的色木槭(*Acer mono*)幼苗在出苗后的第一个生长季死亡率较高。然而, 在陕北黄土丘陵沟壑区, 这方面的研究鲜有报道, 加之该地区生态环境恶劣, 环境因子复杂多样, 降水少, 土壤干旱贫瘠, 不利于幼苗生长。因此, 加强陕北黄土丘陵沟壑区

幼苗存活特征研究, 对了解幼苗更新能力及植被恢复具有非常重要的意义。本研究在陕北黄土丘陵沟壑区的宋家沟和纸坊沟2个典型小流域选择15个固定样地, 对坡沟立地环境下幼苗年内动态变化及存活情况进行了跟踪观测, 分析了不同立地环境下幼苗存活的变化特征, 以期阐明不同立地环境下不同物种的存活能力, 为黄土丘陵沟壑区的植被恢复和重建提供科学依据。

1 材料和方法

1.1 研究区概况

研究区位于陕北黄土丘陵沟壑区延河流域安塞县的宋家沟和纸坊沟流域(105.86°–109.44° E, 36.38°–36.54° N), 海拔高度在997–1 731 m之间。地貌类型主要为黄土梁涧、梁峁状黄土丘陵和沟谷阶地(焦峰等, 2004)。土壤类型以黄绵土为主, 土质疏松, 抗蚀抗冲性差, 水土流失严重。安塞县水土流失面积2 832 km², 占全县总面积的96% (杜英等, 2008)。气候属暖温带半干旱气候, 平均年降水量510 mm, 平均年降水量年际变化大且分布不均匀, 7–9月的降水量占全年降水量的60%左右。无霜期160–180天。年日照时数2 352–2 573 h。≥ 10 °C年积温2 866 °C, 年平均气温8.9 °C (高旺盛和董孝斌, 2003)。

植被区划属森林草原带, 植被类型从南到北由落叶阔叶林逐渐过渡到落叶灌木和草地, 是西北典型的生态环境脆弱区(董孝斌等, 2005; 陈源泉和高旺盛, 2007)。自1999年开始实施退耕还林(草)工程以来, 安塞县累计完成退耕还林7.54 × 10⁴ hm², 其中退耕地造林4.1 × 10⁴ hm², 荒山荒地造林3.44 × 10⁴ hm²。退耕还林主要为以刺槐(*Robinia pseudoacacia*)、油松(*Pinus tabulaeformis*)、山杏(*Armeniaca sibirica*)、山桃(*Amygdalus davidiana*)等为主的乔木林, 以柠条(*Caragana korshinskii*)、沙棘(*Hippophae rhamnoides*)等为主的灌木林。退耕还草草种以沙打旺(*Astragalus adsurgens*)和紫花苜蓿(*Medicago*

sativa)为主。退耕还林(草)工程实施以来,安赛县林草覆盖率由1998年的17.7%提高到36.2%,水土流失治理度达到51.8%,土壤侵蚀模数由1998年的12 000 $t \cdot km^{-2} \cdot a^{-1}$ 下降到目前的6 000–8 000 $t \cdot km^{-2} \cdot a^{-1}$,生态环境开始向良性循环转变(李锦荣等, 2010)。

1.2 样地选择与调查

本研究中的坡沟立地环境包括两个方面:一是根据不同坡向和坡沟不同坡位划分的阳沟坡、阳梁崩坡、崩顶、阴梁崩坡、阴沟坡5种不同的坡沟立地环境;二是将坡面上的鱼鳞坑、浅沟、裸露地、植丛下定义为4种不同的坡面微环境。

2011年10月,在宋家沟和纸坊沟2个流域选择3个自然恢复的梁崩坡,每个梁崩坡按5种不同立地环境选择样地,每种立地环境3个重复,共选择样地

15个(图1),样地基本情况见表1。每个样地中设置3个2 m × 2 m的固定大样方,共45个大样方,再在每个大样方中按对角线设置3个50 cm × 50 cm的小样方,共135个小样方;同时,在上述1对梁崩坡面上按鱼鳞坑、浅沟、裸露地、植丛下4种微环境设置24个小样方,每种微环境3个重复。2012年4–11月,对小样方里的幼苗更新状况进行逐月跟踪调查,详细记录幼苗物种组成、数量、高度、生长状况及死亡情况。每次调查选用不同颜色的牙签进行幼苗标记,以区分不同调查时间幼苗存活与萌发个数。2013年4月对越冬存活幼苗进行调查。

1.3 数据处理

利用Excel 2007软件整理数据,用SPSS 16.0软件对不同立地环境下幼苗密度和存活率的平均值进

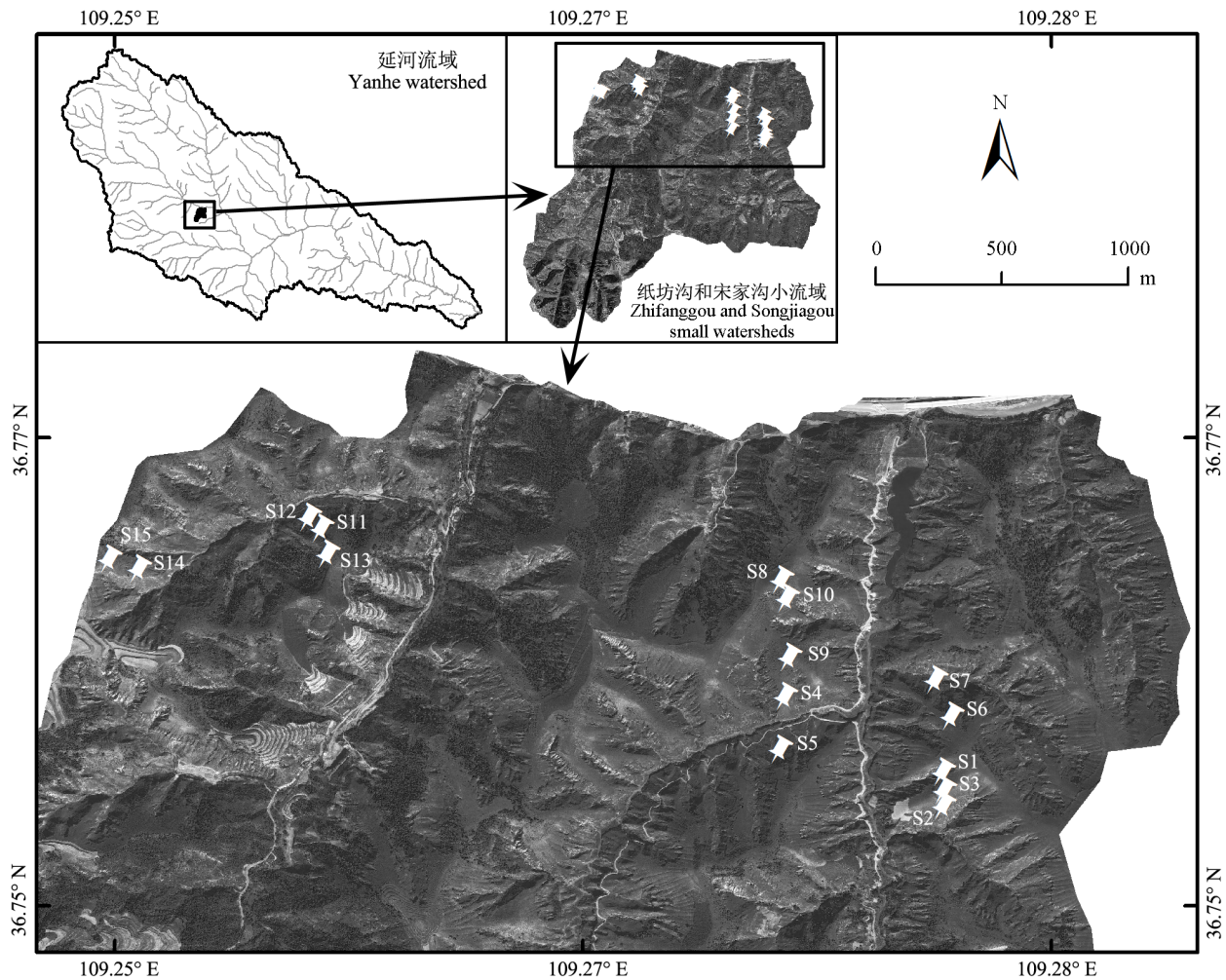


图1 样地分布。字母和数字组合代表样地号,其中S1–S10分布在宋家沟流域,S11–S15分布在纸坊沟流域。
Fig. 1 Location of sampling plots. The combination of letters and numbers indicate sampling plot number. S1–S10 locate in Songjiagou watershed, S11–S15 locate in Zhihangou watershed.

表1 样地基本情况

Table 1 Basic information of sampling plots

立地环境 Habitat	样地号 Plot number	坡度 Slope (°)	种数 Species number	盖度 Coverage (%)	土壤水分 Soil water (%)	土壤养分 Soil nutrient			
						有机质 Organic matter (g·kg ⁻¹)	全N Total nitrogen (g·kg ⁻¹)	速效K Available potassium (mg·kg ⁻¹)	速效P Available phosphorus (mg·kg ⁻¹)
阳沟坡 Sunny gully slope	S2, S4, S14	40	22	30	9.61	3.50	1.33	67.89	16.30
阳梁峁坡 Sunny ridge slope	S3, S10, S15	29	23	20	11.76	2.68	0.81	63.41	12.35
峁顶 Hill top	S8, S9, S13	2	26	38	11.39	3.07	0.92	55.54	9.57
阴梁峁坡 Shady ridge slope	S1, S6, S11	26	31	29	13.36	2.82	0.99	66.19	13.51
阴沟坡 Shady gully slope	S5, S7, S12	32	43	68	18.39	8.13	2.15	103.98	11.75

行单因素方差分析(one-way ANOVA)和LSD检验, 显著性水平为 $p < 0.05$; 并对主要物种在2012年5月到11月和2013年4月8个月幼苗存活率的动态变化进行系统聚类分析(hierarchical cluster analysis), 将具有类似年内存活变化趋势的物种进行归类, 分类相关系数 $r > 0.5$ 。其中: 幼苗月存活率是指某个月份的幼苗存活数占上一个月份幼苗数的比率; 幼苗年内平均存活率是指2012年5月至11月和2013年4月这8个月幼苗存活率的平均值; 幼苗越冬存活率是指2013年4月的幼苗存活数占2012年11月份幼苗数的比率; 幼苗存活曲线是指在2012年5月至次年4月幼苗月存活率的动态变化曲线。

2 结果和分析

2.1 幼苗存活的时空变化特征

2.1.1 幼苗存活的空间变化

坡沟立地环境下幼苗存活特征存在差异(图2)。幼苗年内平均存活率表现为阳沟坡>峁顶>阳梁峁坡或阴梁峁坡>阴沟坡, 其中阳沟坡与阳梁峁坡、阴梁峁坡和阴沟坡, 峁顶与阴沟坡差异显著($p < 0.05$), 其他立地环境间无明显差异($p > 0.05$)。幼苗年内平均密度表现为阴梁峁坡最大, 且与阳沟坡、阳梁峁坡和阴沟坡差异极显著($p < 0.01$), 与峁顶差异不显著($p = 0.796$); 幼苗年内平均密度阳沟坡最小, 且与其他4种立地环境差异显著($p < 0.05$)。可见, 从年内平均值来看, 阳坡幼苗密度较小而存活率较高; 阴坡幼苗密度较大, 但存活率较低。

坡沟立地环境下主要物种幼苗的年内平均存活率与密度不同(图3)。整体上, 细裂叶莲蒿(*Artemisia gmelinii*)、长芒草(*Stipa bungeana*)、阿尔

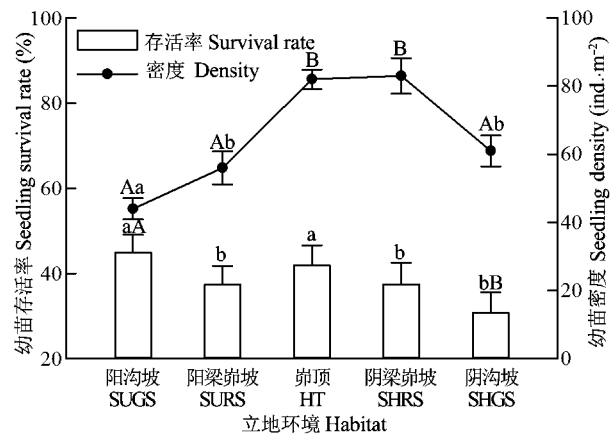


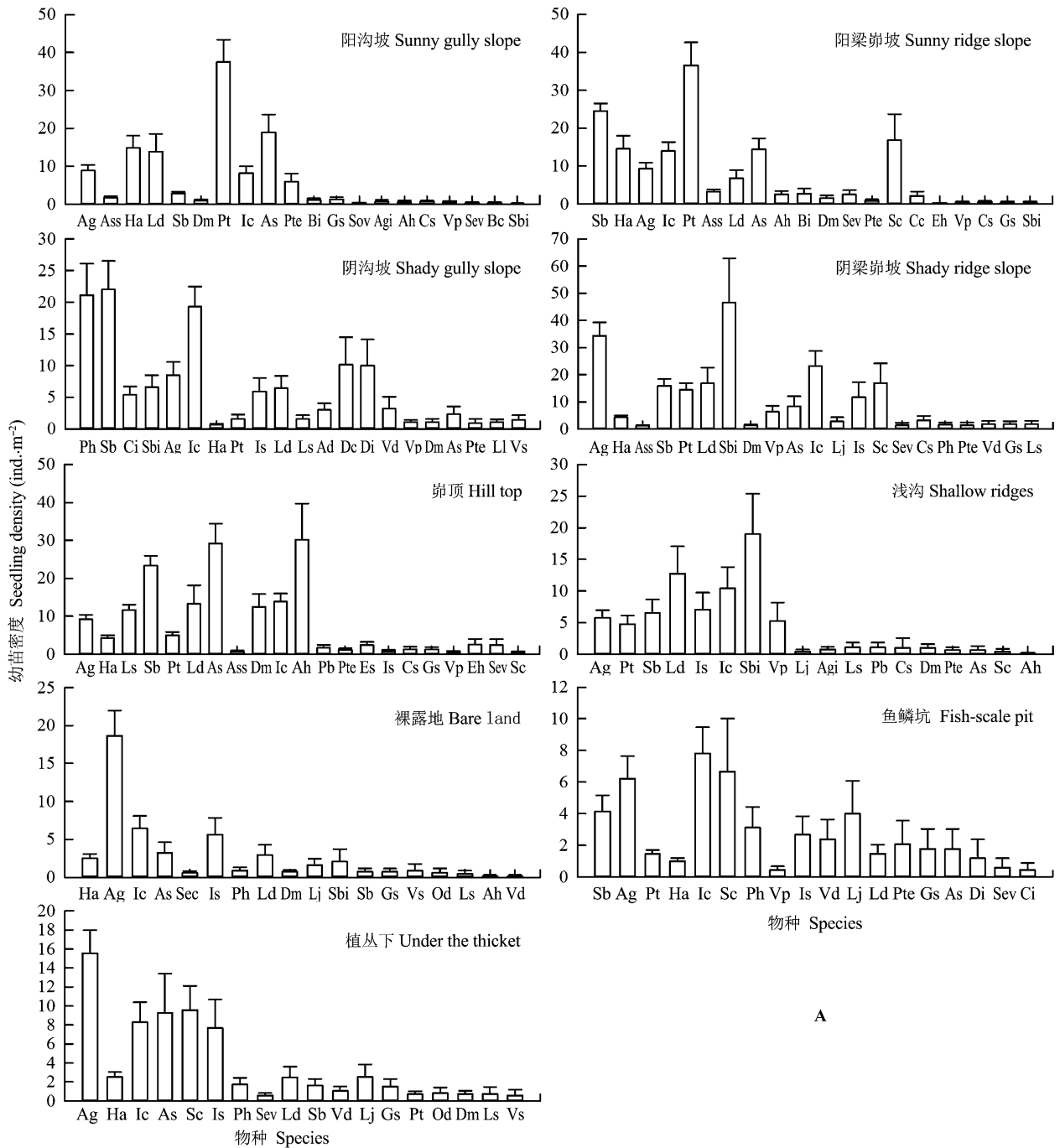
图2 坡沟立地环境下幼苗年内存活率与密度(平均值±标准误差)。不同的大写字母表示差异极显著($p < 0.01$); 不同的小写字母表示差异显著($p < 0.05$)。

Fig. 2 Seedling annual survival rate and density under habitats of hill and gully slope (mean ± SE). HT, hill top; SHGS, shady gully slope; SHRS, shady ridge slope; SUGS, sunny gully slope; SURS, sunny ridge slope. Different capital letters indicate extremely significant differences ($p < 0.01$), different lowercase letters indicate significant differences ($p < 0.05$).

泰狗娃花(*Heteropappus altaicus*)和菊叶委陵菜(*Potentilla tanacetifolia*)幼苗在5种立地环境下的存活率均较高(40.63%–85.77%), 密度变化在2–12个·m⁻²之间; 兴安胡枝子(*Lespedeza davurica*)和糙叶黄芪(*Astragalus scaberrimus*)幼苗在阴沟坡的存活率仅有29.66%, 在其他4种立地环境下存活率均较高(53.53%–76.04%), 密度变化在3–6个·m⁻²之间; 异叶败酱(*Patrinia heterophylla*)和大披针藁草(*Carex lanceolata*)幼苗仅在阴沟坡的存活率较高(64.34%和58.40%), 密度为7和2个·m⁻²; 而中华苦荬菜(*Ixeris chinensis*)幼苗在5种立地环境下的密度均较高(3–6个·m⁻²), 存活率变化在47.78%–63.19%

之间; 猪毛蒿(*Artemisia scoparia*)幼苗在阴沟坡的密度小于1个·m⁻², 在其他4种立地环境下均较高(3–10个·m⁻²), 幼苗存活率在峭顶达到50.00%以上; 阴梁峭坡的阴行草(*Siphonostegia chinensis*)和峭顶的臭蒿(*Artemisia hedinii*)幼苗密度高(6–10个·m⁻²)而存活能力低(27.01%–37.88%); 其他物种, 如紫花地丁(*Viola philippica*)、香青兰(*Dracocephalum moldavica*)、远志(*Polygala tenuifolia*)、火绒草(*Leontopodium leontopodioides*)、狭叶米口袋(*Gueldenstaedtia stenophylla*)、糙隐子草(*Cleistogenes squarrosa*)、狗尾草(*Setaria viridis*)等不仅幼苗数量少且难以存活。可见, 细裂叶莲蒿、菊叶委陵菜、阿尔泰狗娃花、长芒草等演替中后期的优势物种(杨涛等, 2009)在生存竞争中是以“质”取胜, 把大部分能量用于提高存活率上; 而猪毛蒿、中华苦苣菜、阴行草、臭蒿等物种在生存竞争中是以“量”取胜, 幼苗数量较高,

可见, 细裂叶莲蒿、菊叶委陵菜、阿尔泰狗娃花、长芒草等演替中后期的优势物种(杨涛等, 2009)在生存竞争中是以“质”取胜, 把大部分能量用于提高存活率上; 而猪毛蒿、中华苦苣菜、阴行草、臭蒿等物种在生存竞争中是以“量”取胜, 幼苗数量较高,



A

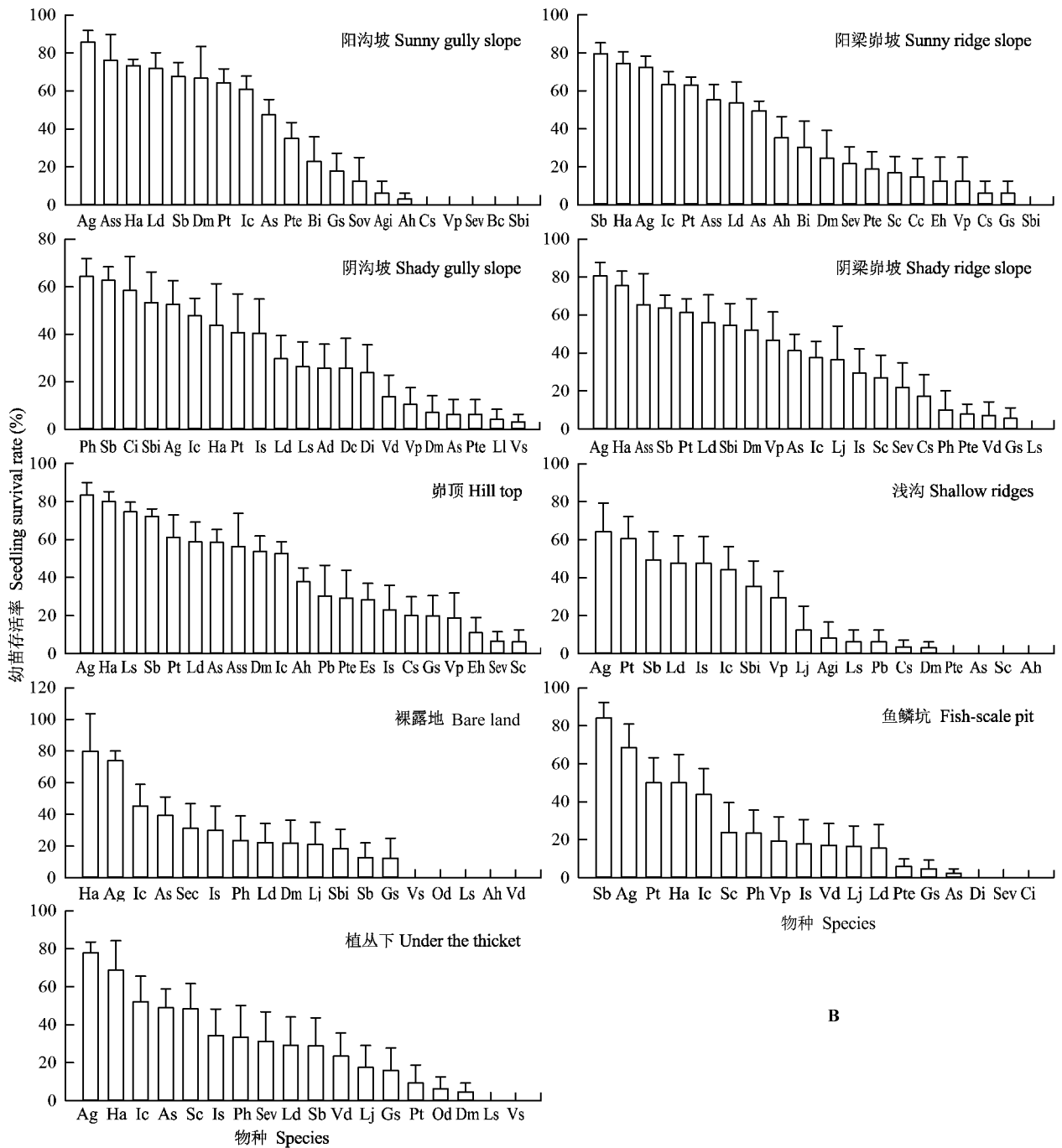


图3 坡沟立地环境下幼苗密度(A)与年内存活率(B)(平均值±标准误差)。Ad, 三裂蛇葡萄; Ag, 细裂叶莲蒿; Agi, 芨蒿; Ah, 臭蒿; As, 猪毛蒿; Ass, 糙叶黄芪; Bc, 斑种草; Bi, 白羊草; Cc, 中华隐子草; Ci, 大披针藁草; Cs, 糙隐子草; Dc, 小红菊; Di, 野菊花; Dm, 香青兰; Eh, 地锦; Es, 牻牛儿苗; Gs, 狭叶米口袋; Ha, 阿尔泰狗娃花; Ic, 中华苦苣菜; Is, 抱茎苦苣菜; Ld, 兴安胡枝子; Lj, 尖叶胡枝子; Ll, 火绒草; Ls, 野亚麻; Od, 二色棘豆; Pb, 二裂委陵菜; Ph, 异叶败酱; Pt, 菊叶委陵菜; Pte, 远志; Sb, 长芒草; Sbi, 獐牙菜; Sc, 阴行草; Sev, 狗尾草; Sov, 狼牙刺; Vd, 裂叶堇菜; Vp, 紫花地丁; Vs, 野豌豆。

Fig. 3 Density of seedlings (A) and annual survival rate of seedlings (B) in habitats of hill and gully slopes (mean ± SE). Ad, *Amelopsis delavayana*; Ag, *Artemisia gmelinii*; Agi, *Artemisia giraldii*; Ah, *Artemisia hedinii*; As, *Artemisia scoparia*; Ass, *Astragalus scaberrimus*; Bc, *Bothriospermum chinense*; Bi, *Bothriochloa ischaemum*; Cc, *Cleistogenes chinensis*; Ci, *Carex lanceolata*; Cs, *Cleistogenes squarrosa*; Dc, *Dendranthema chanelii*; Di, *Dendranthema indicum*; Dm, *Dracocephalum moldavica*; Eh, *Euphorbia humifusa*; Gs, *Gueldenstaedtia stenophylla*; Ha, *Heteropappus altaicus*; Ic, *Ixeris chinensis*; Is, *Ixeris sonchifolia*; Ld, *Lespedeza davurica*; Lj, *Lespedeza juncea*; Ll, *Leontopodium leontopodioides*; Ls, *Linum stelleroides*; Od, *Oxytropis discolor*; Pb, *Potentilla bifurca*; Ph, *Patrinia heterophylla*; Pt, *Potentilla tanacetifolia*; Pte, *Polygala tenuifolia*; Sb, *Stipa bungeana*; Sbi, *Swertia bimaculata*; Sc, *Siphonostegia chinensis*; Sev, *Setaria viridis*; Sov, *Sophora viciifolia*; Vd, *Viola dissecta*; Vp, *Viola philippica*; Vs, *Vicia sepium*.

但竞争能力较弱。

2.1.2 幼苗存活的年内变化

对坡沟立地环境下不同物种幼苗月存活率的动态变化进行系统聚类分析,以阴梁崮坡为例,根据树状图(图4),阴梁崮坡的21个物种具有5类不同的幼苗存活曲线($r = 0.528$),分别为“S”型、“渐减”型、倒“C”型、“U”型、“直线”型(存活率均为0),其他立地环境类似(表2)。不同物种在不同立地环境下的幼苗存活曲线存在差异,整体表现为同一物种在不同立地环境下表现出不同的存活曲线,不同的物种在不同立地环境下也可呈现同一存活曲线。如细裂叶莲蒿的存活曲线在阳沟坡呈“W”型,在阴梁崮坡呈倒“S”型,在崮顶呈倒“C”型,在阴梁崮坡和阴沟坡呈“渐减”趋势。“W”型存活曲线的物种在阳沟坡有菊叶委陵菜和细裂叶莲蒿,在崮顶有长芒草、野亚麻(*Linum stelleroides*)和阿尔泰狗娃花,在阴沟坡则为异叶败酱、中华苦苣菜和小红菊(*Dendranthema chanelii*)等。研究区的幼苗存活曲线整体上表现为8类,分别为“W”型、“M”型、“S”型、倒“S”型、倒“C”型、“U”型、“渐增”型和“渐减”型。其中,“W”型、倒“S”型、倒“C”型和“U”型物种表现为在雨季(6-9月)存活能力相对较强,冬季(10月到次年4月)存活能力相对较弱;“M”型物种表现为6或11月存活能力相对较强,7-10月存活能力相对较弱;“S”型物种表现为9-10月存活能力较强,7-8月或次

年4月存活能力相对较弱;“渐增”型物种表现为11月或次年4月存活能力相对较强,5-6月存活能力相对较弱;而“渐减”型与“渐增”型相反(表2)。

为进一步探讨幼苗存活率的消长情况,对不同立地环境下主要物种4-9月每月出苗的幼苗存活动态(4-9月不断有新幼苗,10月之后无出苗)进行了分析(图5)。结果表明:细裂叶莲蒿、菊叶委陵菜、长芒草、阿尔泰狗娃花(除阴沟坡)等4或5月份的出苗在5种立地环境下的存活时间均较长,且部分成功存活至次年4月,如细裂叶莲蒿在阳沟坡4月出苗13个,次年4月存活3个,阴梁崮坡4月出苗19个,次年4月存活4个,而6-9月出苗的存活时间相对较短,只有少数可以存活至次年;兴安胡枝子在阳沟坡和阴梁崮坡4或6月出苗的存活时间长,其他3种立地环境下4月均未出苗,且7月份出苗的存活时间较长;以上物种在雨季(6-9月)前后的幼苗死亡情况较严重。猪毛蒿在阴梁崮坡和阴沟坡4、5月份出苗少(4-19个)且存活时间短,其他3种立地环境下均出苗多(15-36个),部分幼苗成功存活至次年4月,雨季前(5-6月)的存活状况整体上较好;香青兰仅崮顶6月出苗的幼苗存活至11月份,其他立地环境下幼苗存活时间均较短,6月份之后幼苗大量死亡,在雨季前的存活能力相对较强。其他物种,如糙隐子草、裂叶堇菜(*Viola dissecta*)、狭叶米口袋、火绒草、野亚麻、斑种草(*Bothriospermum chinense*)、臭蒿、远

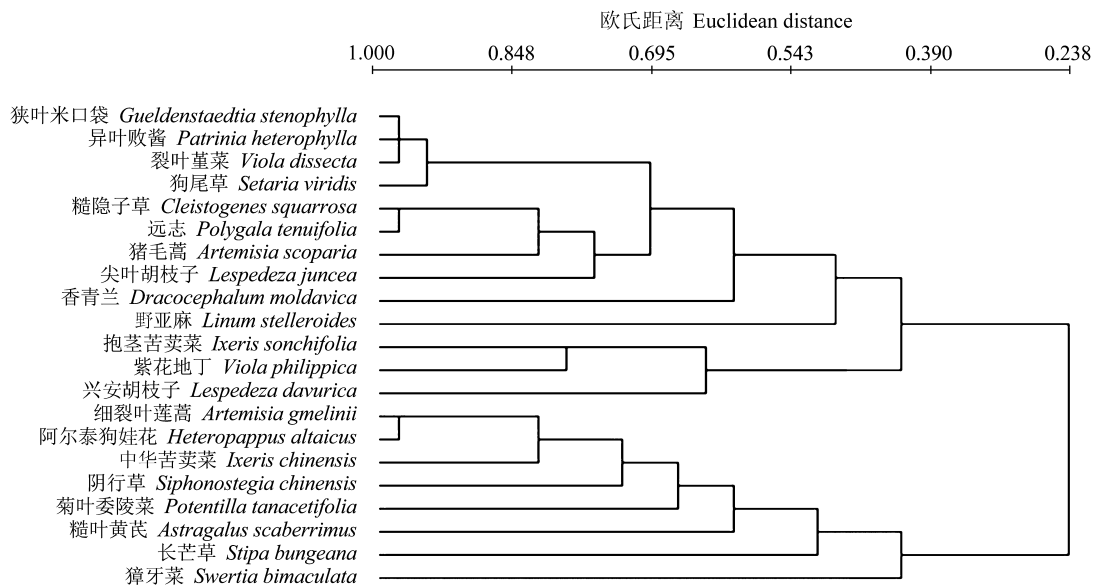
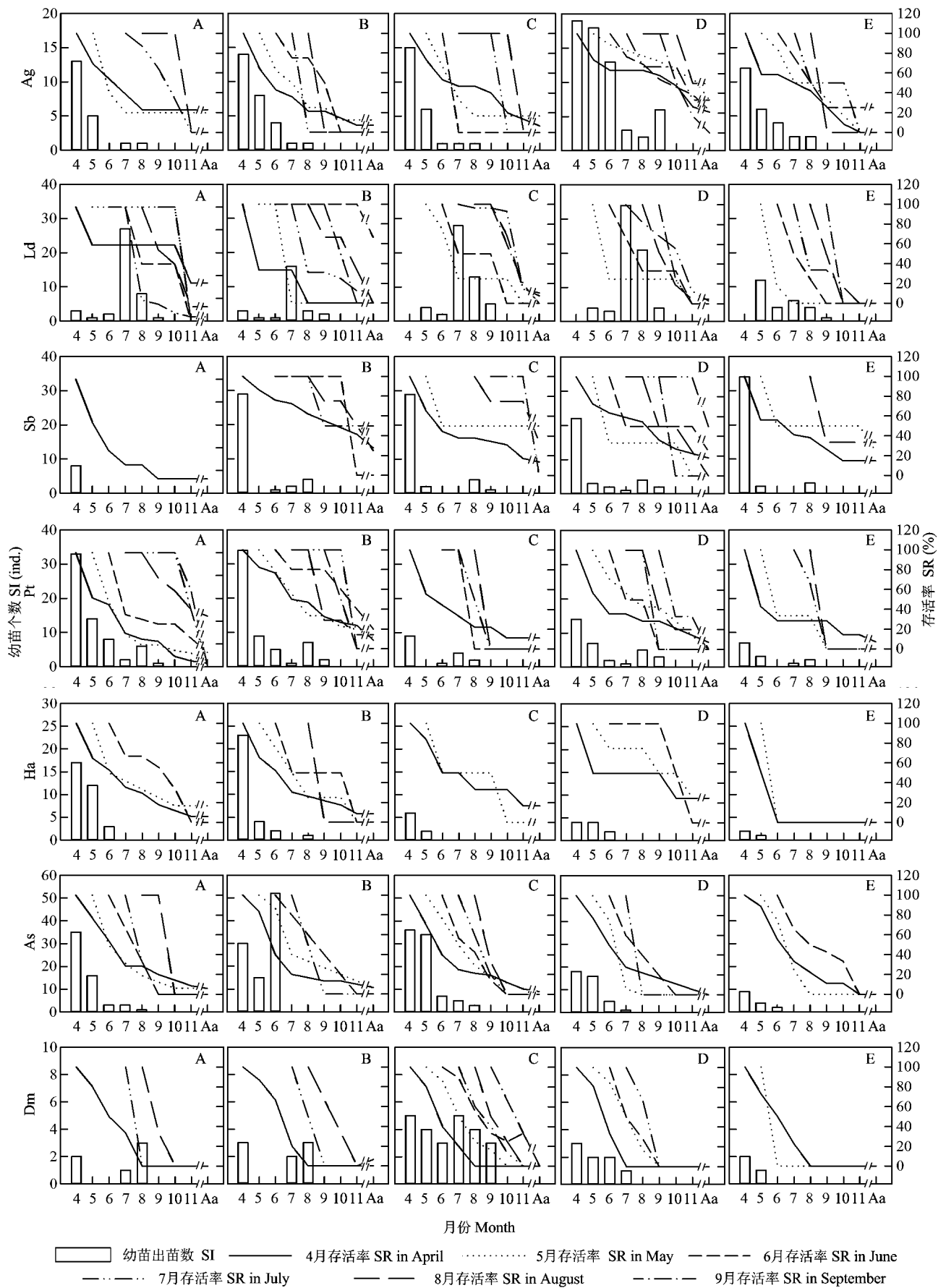


图4 阴梁崮坡幼苗年内存活变化系统聚类分析树状图。

Fig. 4 The tree of hierarchical cluster analysis on variations of seedling survival on shady ridge slope.

表2 坡沟立地环境下主要植物幼苗年内存活曲线
Table 2 Annual survival curves of main plant species in habitats of hill and gully slopes

立地环境 Habitat	类别 Category	物种 Species	存活曲线 Survival curve
阳沟坡 Sunny gully slope	I	菊叶委陵菜 <i>Potentilla tanacetifolia</i> 、细裂叶莲蒿 <i>Artemisia gmelinii</i>	
	II	糙叶黄芪 <i>Astragalus scaberrimus</i> 、兴安胡枝子 <i>Lespedeza davurica</i> 、臭蒿 <i>Artemisia hedinii</i> 、长芒草 <i>Stipa bungeana</i>	
	III	狭叶米口袋 <i>Gueldenstaedtia stenophylla</i> 、香青兰 <i>Dracocephalum moldavica</i> 、远志 <i>Polygala tenuifolia</i> 、阿尔泰狗娃花 <i>Heteropappus altaicus</i> 、猪毛蒿 <i>Artemisia scoparia</i> 、茺蒿 <i>Artemisia giraldii</i> 、中华苦苣菜 <i>Ixeris chinensis</i>	
	IV	白羊草 <i>Bothriochloa ischaemum</i>	
	V	糙隐子草 <i>Cleistogenes squarrosa</i> 、紫花地丁 <i>Viola philippica</i> 、狗尾草 <i>Setaria viridis</i> 、獐牙菜 <i>Swertia bimaculata</i> 、斑种草 <i>Bothriospermum chinense</i>	存活率为0 Zero survival
阳梁峁坡 Sunny ridge slope	I	菊叶委陵菜 <i>Potentilla tanacetifolia</i> 、香青兰 <i>Dracocephalum moldavica</i> 、地锦 <i>Euphorbia humifusa</i> 、狭叶米口袋 <i>Gueldenstaedtia stenophylla</i> 、	
	II	猪毛蒿 <i>Artemisia scoparia</i> 、长芒草 <i>Stipa bungeana</i> 、阿尔泰狗娃花 <i>Heteropappus altaicus</i> 、中华苦苣菜 <i>Ixeris chinensis</i> 、狗尾草 <i>Setaria viridis</i> 、白羊草 <i>Bothriochloa ischaemum</i> 、中华隐子草 <i>Cleistogenes chinensis</i> 、远志 <i>Polygala tenuifolia</i> 、紫花地丁 <i>Viola philippica</i> 、糙隐子草 <i>Cleistogenes squarrosa</i> 、兴安胡枝子 <i>Lespedeza davurica</i>	
	III	细裂叶莲蒿 <i>Artemisia gmelinii</i> 、臭蒿 <i>Artemisia hedinii</i> 、阴行草 <i>Siphonostegia chinensis</i>	
	IV	糙叶黄芪 <i>Astragalus scaberrimus</i>	
	V	獐牙菜 <i>Swertia bimaculata</i>	存活率为0 Zero survival
靠顶 Hill top	I	兴安胡枝子 <i>Lespedeza davurica</i> 、中华苦苣菜 <i>Ixeris chinensis</i> 、香青兰 <i>Dracocephalum moldavica</i> 、细裂叶莲蒿 <i>Artemisia gmelinii</i> 、牻牛儿苗 <i>Erodium stephanianum</i> 、抱茎苦苣菜 <i>Ixeris sonchifolia</i> 、糙叶黄芪 <i>Astragalus scaberrimus</i>	
	II	臭蒿 <i>Artemisia hedinii</i> 、猪毛蒿 <i>Artemisia scoparia</i> 、二裂委陵菜 <i>Potentilla bifurca</i> 、紫花地丁 <i>Viola philippica</i> 、狗尾草 <i>Setaria viridis</i>	
	III	长芒草 <i>Stipa bungeana</i> 、野亚麻 <i>Linum stelleroides</i> 、阿尔泰狗娃花 <i>Heteropappus altaicus</i>	
	IV	菊叶委陵菜 <i>Potentilla tanacetifolia</i> 、地锦 <i>Euphorbia humifusa</i> 、远志 <i>Polygala tenuifolia</i> 、糙隐子草 <i>Cleistogenes squarrosa</i> 、狭叶米口袋 <i>Gueldenstaedtia stenophylla</i>	
	V	阴行草 <i>Siphonostegia chinensis</i>	
阴梁峁坡 Shady ridge slope	I	糙隐子草 <i>Cleistogenes squarrosa</i> 、尖叶胡枝子 <i>Lespedeza juncea</i> 、裂叶堇菜 <i>Viola dissecta</i> 、狭叶米口袋 <i>Gueldenstaedtia stenophylla</i> 、异叶败酱 <i>Patrinia heterophylla</i> 、狗尾草 <i>Setaria viridis</i> 、远志 <i>Polygala tenuifolia</i> 、猪毛蒿 <i>Artemisia scoparia</i> 、香青兰 <i>Dracocephalum moldavica</i>	
	II	细裂叶莲蒿 <i>Artemisia gmelinii</i> 、中华苦苣菜 <i>Ixeris chinensis</i> 、阴行草 <i>Siphonostegia chinensis</i> 、长芒草 <i>Stipa bungeana</i> 、菊叶委陵菜 <i>Potentilla tanacetifolia</i> 、阿尔泰狗娃花 <i>Heteropappus altaicus</i> 、糙叶黄芪 <i>Astragalus scaberrimus</i>	
	III	兴安胡枝子 <i>Lespedeza davurica</i> 、抱茎苦苣菜 <i>Ixeris sonchifolia</i> 、紫花地丁 <i>Viola philippica</i>	
	IV	獐牙菜 <i>Swertia bimaculata</i>	
	V	野亚麻 <i>Linum stelleroides</i>	存活率为0 Zero survival
阴沟坡 Shady gully slope	I	细裂叶莲蒿 <i>Artemisia gmelinii</i> 、野菊花 <i>Dendranthema indicum</i> 、菊叶委陵菜 <i>Potentilla tanacetifolia</i> 、獐牙菜 <i>Swertia bimaculata</i> 、猪毛蒿 <i>Artemisia scoparia</i> 、香青兰 <i>Dracocephalum moldavica</i>	
	II	异叶败酱 <i>Patrinia heterophylla</i> 、中华苦苣菜 <i>Ixeris chinensis</i> 、小红菊 <i>Dendranthema chanelii</i> 、兴安胡枝子 <i>Lespedeza davurica</i> 、阿尔泰狗娃花 <i>Heteropappus altaicus</i> 、抱茎苦苣菜 <i>Ixeris sonchifolia</i>	
	III	大披针藜草 <i>Carex lanceolata</i> 、三裂蛇葡萄 <i>Ampelopsis delavayana</i> 、裂叶堇菜 <i>Viola dissecta</i> 、野亚麻 <i>Linum stelleroides</i> 、紫花地丁 <i>Viola philippica</i> 、远志 <i>Polygala tenuifolia</i> 、火绒草 <i>Leontopodium leontopodioides</i>	
	IV	长芒草 <i>Stipa bungeana</i>	
	V	野豌豆 <i>Vicia sepium</i>	



志、紫花地丁、地锦(*Euphorbia humifusa*)等在出苗后的1-2月内全部死亡, 幼苗年内存活时间短, 存活动态不明显。

综上可知, 细裂叶莲蒿、菊叶委陵菜、长芒草、兴安胡枝子、阿尔泰狗娃花等物种4月份出苗的幼苗年内存活时间长, 部分幼苗能够成功地存活至次年4月份, 且这些物种在雨季存活能力较强; 而猪毛蒿、香青兰、臭蒿等物种在雨季前幼苗存活能力相对较强, 在冬季存活能力较弱; 其他少数物种, 如糙隐子草、裂叶堇菜、火绒草、斑种草等的幼苗存活能力在不同立地环境下存在一定差异(表2; 图5)。

2.2 幼苗越冬特征

越冬后幼苗在坡沟立地环境下整体表现为阳坡幼苗密度小, 存活率高, 阴坡幼苗密度大, 但存活率低, 且不同物种的幼苗越冬特征存在差异, 其中阿尔泰狗娃花、细裂叶莲蒿、菊叶委陵菜、兴安胡枝子和长芒草5个物种除阴沟坡外, 在其他4种立地环境中均有出现, 且在阳沟坡、阳梁峁坡和峁顶的存活能力较强, 越冬存活率均在50.00%以上, 最高可达100%, 越冬后密度变化在1-11个·m⁻²之间, 阳沟坡的糙叶黄芪和白羊草(*Bothriochloa ischaemum*)幼苗的越冬存活率也较高(100%), 越冬后密度均为1个·m⁻²; 而阴沟坡仅有长芒草、中华苦苣菜、野菊花、异叶败酱和大披针藁草能够成功越冬, 除长芒草的存活能力较强外(越冬存活率为70.00%, 越冬后密度为7个·m⁻²), 其余物种的越冬存活率均小于50.00%, 越冬后密度在1-6个·m⁻²之间(表3)。可见, 不同立地环境下幼苗的越冬特征存在差异, 整体上细裂叶莲蒿、阿尔泰狗娃花、菊叶委陵菜、兴安胡枝子和长芒草的越冬能力较强, 在幼苗更新和植被恢复中具有非常重要的作用。

2.3 坡面微环境对幼苗存活的影响

坡面微环境不同, 幼苗存活特征也存在差异(图3)。幼苗年内平均存活率表现为植丛下>鱼鳞坑>

裸露地>浅沟, 但均无显著差异($p > 0.05$); 幼苗年内平均密度表现为浅沟>植丛下>鱼鳞坑>裸露地, 其中裸露地与浅沟差异极显著($p = 0.004$), 与植丛下差异显著($p = 0.032$), 其他微环境间无显著差异($p > 0.05$)(图6)。可见, 植丛下的幼苗存活率和幼苗密度均较高, 裸露地幼苗存活率和幼苗密度均较低, 浅沟虽幼苗密度高但存活率较低。

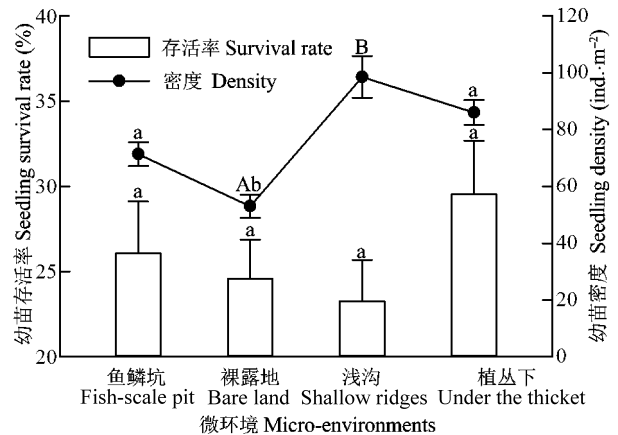


图6 坡面不同微环境下幼苗年内存活率与密度(平均值±标准误差)。不同的大写字母表示差异极显著($p < 0.01$); 不同的小写字母表示差异显著($p < 0.05$)。

Fig. 6 Annual survival rate and density of seedlings in different micro-environments on slope (mean ± SE). Different capital letters indicate extremely significant differences ($p < 0.01$); different lowercase letters indicate significant differences ($p < 0.05$).

不同微环境下幼苗越冬特征表现为: 细裂叶莲蒿、菊叶委陵菜、阿尔泰狗娃花和长芒草4个物种在鱼鳞坑出现, 且越冬存活率均高达75.00%以上, 越冬后密度较小, 为1-3个·m⁻²; 植丛下有细裂叶莲蒿、菊叶委陵菜和阴行草3个物种, 越冬存活率在57.14%-75.00%之间, 越冬后密度变化在2-4个·m⁻²之间; 浅沟和裸露地均仅有2个物种能够成功地越冬, 其中, 浅沟有细裂叶莲蒿和菊叶委陵菜, 越冬

←

图5 坡沟立地环境下主要物种幼苗4-9月份每月出苗幼苗的存活动态。4-9月份的存活率是指4-9月份每个月出苗的幼苗在之后每个月的存活比率。A, 阳沟坡; B, 阳梁峁坡; C, 峁顶; D, 阴梁峁坡; E, 阴沟坡。Ag, 细裂叶莲蒿; As, 猪毛蒿; Dm, 香青兰; Ha, 阿尔泰狗娃花; Ld, 兴安胡枝子; Pt, 菊叶委陵菜; Sb, 长芒草。Aa, 次年4月份。

Fig. 5 Survival dynamics of the seedlings of main species emerged monthly from April through September in habitats of hill and gully slope. The survival rate from April to September is the proportion of seedlings emerged monthly from April to September that survived in the following months. A, sunny gully slope; B, sunny ridge slope; C, hill top; D, shady ridge slope; E, shady gully slope. Ad, *Ampelopsis delavayana*; As, *Artemisia scoparia*; Dm, *Dracocephalum moldavica*; Ha, *Heteropappus altaicus*; Ld, *Lespedeza davurica*; Pt, *Potentilla tanacetifolia*; Sb, *Stipa bungeana*. Aa, April in the after year. SI, seedling individual; SR, survival rate.

表3 坡沟立地环境下幼苗越冬特征
Table 3 Overwintering characteristics of seedlings in habitats of hill and gully slope

物种 Species	阳沟坡 Sunny gully slope			阳梁峁坡 Sunny ridge slope			阴梁峁坡 Shady ridge slope			阴沟坡 Shady gully slope		
	越冬前密度 Density before (ind.·m ⁻²)	越冬后密度 Density after (ind.·m ⁻²)	越冬存活率 Over-wintering survival rate (%)	越冬前密度 Density before (ind.·m ⁻²)	越冬后密度 Density after (ind.·m ⁻²)	越冬存活率 Over-wintering survival rate (%)	越冬前密度 Density before (ind.·m ⁻²)	越冬后密度 Density after (ind.·m ⁻²)	越冬存活率 Over-wintering survival rate (%)	越冬前密度 Density before (ind.·m ⁻²)	越冬后密度 Density after (ind.·m ⁻²)	越冬存活率 Over-wintering survival rate (%)
阿尔泰狗娃花 <i>Heteropappus altaicus</i>	5	4	80.00	4	3	75.00	2	2	100.00	3	1	33.33
细裂叶莲蒿 <i>Artemisia gmelinii</i>	5	5	100.00	4	3	75.00	6	4	66.67	29	11	37.93
菊叶委陵菜 <i>Potentilla tanacetifolia</i>	16	11	68.75	16	8	50.00	3	2	66.67	9	3	33.33
兴安胡枝子 <i>Lespedeza davurica</i>	5	4	80.00	4	3	75.00	3	2	66.67	1	1	100.00
长芒草 <i>Stipa bungeana</i>	2	1	50.00	21	11	52.38	13	11	84.62	10	4	40.00
中华苦苣菜 <i>Ixeris chinensis</i>	7	3	42.86	10	4	40.00	9	4	44.44	7	3	42.86
猪毛蒿 <i>Artemisia scoparia</i>	10	3	30.00	7	3	42.86	14	5	35.71	10	4	40.00
白羊草 <i>Bothriochloa ischaemum</i>	1	1	100.00	5	1	20.00						
糙叶黄芪 <i>Astragalus scaberrimus</i>	1	1	100.00	3	1	33.33						
野菊花 <i>Dendranthema indicum</i>										3	1	33.33
异叶败酱 <i>Patrinia heterophylla</i>										13	6	46.15
大披针藁草 <i>Carex lanceolata</i>										8	3	37.50
平均 Mean	6	3	72.40	8	4	51.51	7	4	66.40	10	4	48.92

表4 坡面不同微环境下幼苗越冬特征
Table 4 Overwintering characteristics of seedlings in different micro-environments on slope

物种 Species	鱼鳞坑 Fish-scale pit			裸露地 Bare land			浅沟 Shallow ridges			植丛下 Under the thicket		
	越冬前密度 Density before wintering (ind.·m ⁻²)	越冬后密度 Density after wintering (ind.·m ⁻²)	越冬存活率 Overwintering survival rate (%)	越冬前密度 Density before wintering (ind.·m ⁻²)	越冬后密度 Density after wintering (ind.·m ⁻²)	越冬存活率 Overwintering survival rate (%)	越冬前密度 Density before wintering (ind.·m ⁻²)	越冬后密度 Density after wintering (ind.·m ⁻²)	越冬存活率 Overwintering survival rate (%)	越冬前密度 Density before wintering (ind.·m ⁻²)	越冬后密度 Density after wintering (ind.·m ⁻²)	越冬存活率 Overwintering survival rate (%)
细裂叶莲蒿 <i>Artemisia gmelinii</i>	4	3	75.00	12	8	66.67	4	3	75.00	7	4	57.14
菊叶委陵菜 <i>Potentilla tanacetifolia</i>	1	1	100.00		4		4	2	50.00	4	3	75.00
阿尔泰狗娃花 <i>Heteropappus altaicus</i>	1	1	100.00	2	1	50.00						
长芒草 <i>Stipa bungeana</i>	4	3	75.00							3	2	66.67
阴行草 <i>Siphonostegia chinensis</i>	3	2	87.50	7	5	58.34	4	3	62.50	5	3	66.27
平均 Mean												

存活率分别为75.00%和50.00%，越冬后密度2-3个·m⁻²，裸露地是细裂叶莲蒿和阿尔泰狗娃花的越冬存活率较高，分别为66.67%和50.00%，越冬后密度分别为8和1个·m⁻² (表4)。可见，微环境的改变对幼苗的生长、存活和越冬均有一定的影响。

3 讨论

幼苗是植被恢复演替的基础，从种子萌发到幼苗建植期间对外界环境反应最为敏感，出土的幼苗能否抵抗恶劣的环境条件而成功地存活直接关系到地上植物群落的更新和恢复。本研究发现，坡沟立地环境下，幼苗存活特征差异明显，整体表现为阳坡幼苗密度较小而存活率较高，阴坡幼苗密度较大但存活率较低。这与康冰等(2012)对黄土高原子午岭辽东栎(*Quercus wutaishanica*)幼苗密度的研究结果一致。这主要是因为阳坡坡度相对较大，植被覆盖度小，土壤侵蚀严重，土壤水分、养分条件差(表1)，从而影响了种子的萌发和幼苗的生长，导致幼苗密度较小(Li *et al.*, 2011; Wang *et al.*, 2012; Song *et al.*, 2013)。但阳坡的主要物种，如细裂叶莲蒿、白羊草、兴安胡枝子等为喜阳耐旱型植物，其根系发达，土壤抗侵蚀能力强，故存活能力相对较强。阴坡土壤水分、养分条件好(周萍等, 2008)，且植被种类多(表1)，为幼苗萌发提供了充足的种源，幼苗密度大，但阴坡的低温度和弱光照抑制了幼苗的生长和存活(González-Rivas *et al.*, 2009)，导致存活率下降。黄忠良等(2001)的研究也表明，在较强的光照条件下，有较多物种的幼苗可以生长，而光照较弱时，只有耐阴性的物种可以成功地完成其生活史。

不同物种在不同立地环境下的幼苗存活曲线存在差异。从8类不同的幼苗存活曲线、主要物种幼苗存活动态及幼苗越冬特征可以看出：研究区内细裂叶莲蒿、菊叶委陵菜、长芒草、阿尔泰狗娃花和兴安胡枝子等物种在雨季(6-9月)的存活能力较强，且具有较强的越冬能力；而猪毛蒿、香青兰、臭蒿等物种在雨季前(5-6月)的存活能力较强，冬季存活能力较弱。这是因为：在干季，降水量是幼苗成功定居的限制因子，本研究区的10月到次年4月属于干季(降水量小于60 mm)，而且气温较低，成为幼苗成活的障碍(黄忠良等, 2001; Castro-Morales *et al.*, 2014)。Zhu等(2014)也指出：在半干旱草原带的鄂尔多斯，由气候条件引起的降水量和降雨频率的改变

显著影响着赖草(*Leymus secalinus*)幼苗的出苗和种群重建。另外,这与物种生物学特性也有关,如细裂叶莲蒿、菊叶委陵菜、长芒草等物种,其种子较小,无明显的休眠特征,种子萌发早且萌发时间短(宗文杰等, 2006; 张小彦等, 2010),雨季后大部分幼苗已经木质化,在一定程度上可以抵抗土壤侵蚀、高温、霜冻等对其破坏,故其在雨季和冬季的存活能力相对较强;而猪毛蒿、香青兰、臭蒿等,幼苗个体小且根系不发达,虽然雨季时不断增加的土壤水分含量和土壤水分有效性促进了幼苗的生长(Saikia & Khan, 2012),但生长旺盛的地上植被对土壤水分、土壤养分、光照等资源的竞争使幼苗的存活率呈下降趋势(Robin & Jodie, 2008);另外,雨季时严重的土壤侵蚀会使幼苗根系曝露而死亡(García-Fayos & Gasque, 2006)。因此,根据物种特性在适当的时期对幼苗进行一定的抚育管理和保护措施将有利于幼苗的更新和建植,对植被恢复和重建起到重要作用。

在干旱半干旱气候条件下,微环境的改变对幼苗出苗和成功建植极为重要(Puignaire & Haase, 1996; Tsuyuzaki *et al.*, 1997)。因为不同微地形使坡面凹凸不平,影响降雨在坡面上的再分配过程(邝高明等, 2012),进而影响土壤水分和幼苗在坡面上的分布。本研究显示,在黄土丘陵沟壑区,微环境的改变在一定程度上影响了幼苗的存活、生长和越冬。植丛下受植物冠层的保护,土壤侵蚀较弱(Du *et al.*, 2013),且土壤水分和养分条件较好(Titus & Moral, 1998; Barberá *et al.*, 2006),有利于幼苗的存活和生长,加之生长旺盛的地上植被为植丛下土壤种子库提供了丰富的种源(王增如等, 2008),并对幼苗起到了一定的保护作用(庇阴或保温)(程积民等, 2009),导致植丛下幼苗密度大且存活能力较强;而在裸露地,地上植被稀疏,种子来源较少(Titus & Moral, 1998),缺少枯枝落叶层,使地面暴露,光照强烈,蒸发量大,持水能力弱(Bryndís *et al.*, 2013),土壤水分含量降低,幼苗萌发少且大量死亡(Wang *et al.*, 2012)。Barberá等(2006)在半干旱草原带伊比利亚半岛的研究也证实了这一结论:植丛下幼苗数量多且生长快,裸露地幼苗数量少且生长慢。在同一坡面上,浅沟内的水分条件优于坡面(路保昌等, 2009),种子的萌发率增加,但强烈的径流冲刷过程会将幼苗连根拔起而死亡(Titus & Moral, 1998),从而导致

浅沟幼苗密度大而存活率低,尤其是在2012年7月和9月,研究区暴雨多,降水量分别高达126.7和124.8 mm,浅沟内径流的冲刷作用加剧,幼苗平均存活率仅为31.13%,密度高达129个·m⁻²,而其他微环境下存活率变化在35.37%–40.56%之间,密度变化在66–93个·m⁻²之间。Titus和Moral (1998)在华盛顿圣海伦山浮石平原(沿海气候)的研究也表明,在浅沟微地形环境上,珠光香青(*Anaphalis margaritacea*)和假蒲公英猫儿菊(*Hypochaeris radicata*)的幼苗密度均较大,但只有种子较大的假蒲公英猫儿菊的幼苗存活率较高。

在黄土丘陵沟壑区,幼苗在一定程度上对该区植被的更新具有重要的保障作用。本文仅分析了坡沟立地环境下幼苗的存活特征,有关幼苗存活的关键影响因子及幼苗在生存竞争中的对策问题还有待于进一步研究。

基金项目 国家自然科学基金重点项目(41030532)和中国科学院重要方向项目(KZCX2-EW-406)。

参考文献

- Albrecht MA, McCarthy BC (2009). Seedling establishment shapes the distribution of shade-adapted forest herbs across a topographical moisture gradient. *Journal of Ecology*, 97, 1037–1049.
- Barberá GG, Navarro-Cano JA, Castillo VM (2006). Seedling recruitment in a semi-arid steppe: the role of microsite and post-dispersal seed predation. *Journal of Arid Environments*, 67, 701–714.
- Bryndís M, Thóra ET, Kristín S (2013). An experimental test of the relationship between small scale topography and seedling establishment in primary succession. *Plant Ecology*, 214, 1007–1015.
- Castro-Morales LM, Quintana-Ascencio PF, Fauth JE, Ponzio KJ, Hall DL (2014). Environmental factors affecting germination and seedling survival of Carolina willow (*Salix caroliniana*). *Society of Wetland Scientists*, 22, doi: 10.1007/s13157-014-0513-6.
- Chen YQ, Gao WS (2007). Green accounting for agriculture production based on the value of agroecosystem services: a case study of Ansai County. *Acta Ecologica Sinica*, 27, 250–259. (in Chinese with English abstract) [陈源泉, 高旺盛 (2007). 基于农业生态服务价值的农业绿色GDP核算——以安塞县为例. *生态学报*, 27, 250–259.]
- Cheng JM, Wan HE, Hu XM (2006). Soil seed bank and meadow renewal in the grassland on Loess Plateau. *Acta Pedologica Sinica*, 43, 679–683. (in Chinese with English abstract) [程积民, 万惠娥, 胡相明 (2006). 黄土高原草

- 地土壤种子库与草地更新. 土壤学报, 43, 679–683.]
- Cheng JM, Zhao LP, Cheng J (2009). Seed quality and forest regeneration of a 60-year *Quercus liaotungensis* forest in the Ziwuling region, northwestern China. *Journal of Beijing Forestry University*, 31(2), 10–16. (in Chinese with English abstract) [程积民, 赵凌平, 程杰 (2009). 子午岭60年辽东栎林种子质量与森林更新. 北京林业大学学报, 31(2), 10–16.]
- Chidumayo EN (2013). Effects of seed burial and fire on seedling and sapling recruitment, survival and growth of African savanna woody plant species. *Plant Ecology*, 214, 103–114.
- Dong XB, Gao WS, Yan MC (2005). Energy evaluation of the coupling effects of ecological economic systems of two selected counties in the ecotone between agriculture and pasture in North China. *Transactions of the CSAE*, 21(11), 1–6. (in Chinese with English abstract) [董孝斌, 高旺盛, 严茂超 (2005). 基于能值理论的农牧交错带两个典型县域生态经济系统的耦合效应分析. 农业工程学报, 21(11), 1–6.]
- Du HD, Jiao JY, Jia YF, Wang N, Wang DL (2013). Phyto-genic mounds of four typical shoot architecture species at different slope gradients on the Loess Plateau of China. *Geomorphology*, 193, 57–64.
- Du Y, Yang GH, Liu ZC, Feng YZ (2008). Energy evaluation on ecological and economic systems of converting farmland into forest (grassland) project in loess hilly and gully areas—a case study of Ansai County. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 26(5), 189–196. (in Chinese with English abstract) [杜英, 杨改河, 刘志超, 冯永忠 (2008). 黄土丘陵区退耕还林(草)生态经济系统的能值分析——以安塞县为例. 干旱地区农业研究, 26(5), 189–196.]
- Gao WS, Dong XB (2003). Valuation of fragile agriculture ecosystem services in loess hilly-gully region: a case study of Ansai County. *Journal of Natural Resources*, 18(2), 182–188. (in Chinese with English abstract) [高旺盛, 董孝斌 (2003). 黄土高原丘陵沟壑区脆弱农业生态系统服务评价——以安塞县为例. 自然资源学报, 18(2), 182–188.]
- Gao XM, Du XJ, Wang ZL (2003). Comparison of seedling recruitment and establishment of *Quercus wutaishanica* in two habitats in Dongling mountainous area, Beijing. *Acta Phytocologica Sinica*, 27, 404–411. (in Chinese with English abstract) [高贤明, 杜晓军, 王中磊 (2003). 北京东灵山两种生境条件下辽东栎幼苗补充与建立的比较. 植物生态学报, 27, 404–411.]
- García-Fayos F, Gasque M (2006). Seed vs. microsite limitation for seedling emergence in the perennial grass *Stipa tenacissima* L. (Poaceae). *Acta Oecologica*, 30, 276–282.
- García-Serrano H, Escarré J, Sans FX (2004). Factors that limit the emergence and establishment of the related aliens *Senecio inaequidens* and *Senecio pterophorus* and the native *Senecio malacitanus* in Mediterranean climate. *Canadian Journal of Botany*, 82(9), 1–5.
- González-Rivas B, Tigabu M, Castro-Marín G, Odén PC (2009). Seed germination and seedling establishment of neotropical dry forest species in response to temperature and light conditions. *Journal of Forestry Research*, 20, 99–104.
- Guo H, Wang XA, Wang SX, Fan WY (2010). Dynamic life table and analysis on survival of *Quercus liaotungensis* seedlings in Mt. Ziwuling of the Loess Plateau. *Arid Zone Research*, 28, 1005–1010. (in Chinese with English abstract) [郭华, 王孝安, 王世雄, 范玮熠 (2010). 黄土高原子午岭辽东栎(*Quercus liaotungensis*)幼苗动态生命表及生存分析. 干旱区研究, 28, 1005–1010.]
- Huang ZL, Peng SL, Yi S (2001). Factors affecting seedling establishment in monsoon evergreen broad-leaved forest. *Journal of Tropical and Subtropical Botany*, 9, 123–128. (in Chinese with English abstract) [黄忠良, 彭少麟, 易俗 (2001). 影响季风常绿阔叶林幼苗定居的主要因素. 热带亚热带植物学报, 9, 123–128.]
- Jalili A, Hamzeh'ee B, Asri Y, Shirvany A, Yazdani S, Khoshnevis M, Zarrinkamar F, Ghahramani MA, Safavi R, Shaw S, Hodgson JG, Thompson K, Akbarzadeh M, Pakparvar M (2003). Soil seed banks in the Arasbaran Protected Area of Iran and their significance for conservation management. *Biological Conservation*, 109, 425–431.
- Jia YF, Jiao JY, Wang N (2013). Relationship between seedling and mature vegetation on the hilly-gullied Loess Plateau. *Springerplus*, 2(Suppl. 1), S17. doi:10.1186/2193-1801-2-S1-S17.
- Jiao F, Wen ZM, Shi H, Wang F, Zhang XP, Yang QK, Li R (2004). Land structure of Ansai County in the Loess Plateau. *Journal of Mountain Science*, 22, 406–410. (in Chinese with English abstract) [焦峰, 温仲明, 石辉, 王飞, 张晓萍, 杨勤科, 李锐 (2004). 黄土丘陵沟壑区安塞县土地结构. 山地学报, 22, 406–410.]
- Kang B, Wang DX, Li G, Gao YX, Zhang Y, Du YL (2012). Characteristics of seedlings regeneration in *Quercus aliena* var. *acuteserrata* secondary forests in Qinling Mountains. *Acta Ecologica Sinica*, 32, 2738–2747. (in Chinese with English abstract) [康冰, 王得祥, 李刚, 高妍夏, 张莹, 杜焰玲 (2012). 秦岭山地锐齿栎次生林幼苗更新特征. 生态学报, 32, 2738–2747.]
- Kuang GM, Zhu QK, Liu ZQ, Zhao H, Wang J (2012). Effect of microrelief on the soil water and vegetation arrangement in loess hilly and gully region. *Research of Soil and Water Conservation*, 19(3), 74–77. (in Chinese with English abstract) [邝高明, 朱清科, 刘中奇, 赵荟, 王晶 (2012). 黄土丘陵沟壑区微地形对土壤水分及生物量的

- 影响. 水土保持研究, 19(3), 74–77.]
- Li F, Li YZ, Qin HY, Xie YH (2011). Plant distribution can be reflected by the different growth and morphological responses to water level and shade in two emergent macrophyte seedlings in the Sanjiang Plain. *Aquatic Ecology*, 45, 89–97.
- Li FR, Wang T, Zhang AS, Zhao LY, Kang LF, Chen W (2005). Wind-dispersed seed deposition patterns and seedling recruitment of *Artemisia halodendron* in a moving sandy land. *Annals of Botany*, 96, 69–80.
- Li JR, Sun BP, Ling X (2010). Study on land use and dynamic changes of vegetation cover and after the project of returning farmlands—taking the Ansai County as example. *Journal of Inner Mongolia Agricultural University*, 31(3), 130–135. (in Chinese with English abstract) [李锦荣, 孙保平, 凌侠 (2010). 退耕还林工程前后土地利用与植被盖度动态变化研究——以安塞县为例. 内蒙古农业大学学报, 31(3), 130–135.]
- Liu HL, Shi X, Wang JC, Yin LK, Huang ZY, Zhang DZ (2011). Effects of sand burial, soil water content and distribution pattern of seeds in sand on seed germination and seedling survival of *Eremosparton songoricum* (Fabaceae), a rare species inhabiting the moving sand dunes of the Gurbantunggut Desert of China. *Plant and Soil*, 345, 69–87.
- Lu BC, Xue ZD, Zhu QK, Li HK (2009). Soil water in micro-terrain on sunny and semi-sunny slopes. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 29(1), 1–3. (in Chinese with English abstract) [路保昌, 薛智德, 朱清科, 李会科 (2009). 干旱阳坡半阳坡微地形土壤水分分布研究. 水土保持通报, 29(1), 1–3.]
- Maestre FT, Cortina J, Bautista S, Bellot J, Vallejo R (2003). Small-scale environmental heterogeneity and spatiotemporal dynamics of seedling establishment in a semiarid degraded ecosystem. *Ecosystems*, 6, 630–643.
- Marushia RG, Holt JS (2008). Reproductive strategy of an invasive thistle: effects of adults on seedling survival. *Biological Invasions*, 10, 913–924.
- Puignaire FI, Haase P (1996). Comparative physiology and growth of two perennial tussock grass species in a semi-arid environment. *Annals of Botany*, 77, 81–86.
- Robin GM, Jodie SH (2008). Reproductive strategy of an invasive thistle: effects of adults on seedling survival. *Biological Invasions*, 10, 913–924.
- Saikia P, Khan ML (2012). Seedling survival and growth of *Aquilaria malaccensis* in different microclimatic conditions of Northeast India. *Journal of Forestry Research*, 23, 569–574.
- Seiwa K (2000). Effects of seed size and emergence time on tree seedling establishment: importance of developmental constraints. *Oecologia*, 123, 208–215.
- Song B, Stöcklin J, Gao YQ, Zhang ZQ, Yang Y, Li ZM, Sun H (2013). Habitat-specific responses of seed germination and seedling establishment to soil water condition in two *Rheum* species in the high Sino-Himalayas. *Ecological Research*, 28, 643–651.
- Takashi M, Katsuhiko O, Kazunori T, Kazuhiko H (2005). Seedling dynamics of *Acer mono* and *Fagus crenata*: an environmental filter limiting their adult distributions. *Plant Ecology*, 177, 189–199.
- Tara A, Daniel F (2004). Seedling establishment and life history trade-offs in alpine plants. *American Journal of Botany*, 91, 1147–1153.
- Titus JH, Moral R (1998). Seedling establishment in different microsites on Mount St. Helens, Washington, USA. *Plant Ecology*, 134, 13–26.
- Tsuyuzaki S, Titus JH, del Moral R (1997). Seedling establishment patterns on the Pumice Plain, Mount St. Helens, Washington. *Journal of Vegetation Science*, 8, 727–734.
- Wang ZR, Xu HL, Yin LK, Li JM, Zhang ZJ, Li Y (2008). Contribution of soil seed bank to the regeneration of damaged vegetation on floodplain. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 19, 2611–2617. (in Chinese with English abstract) [王增如, 徐海量, 尹林克, 李吉玫, 张占江, 李媛 (2008). 土壤种子库对漫溢区受损植被更新的贡献. 应用生态学报, 19, 2611–2617.]
- Wang ZR, Yang GJ, Yi SH, Chen SY, Wu Z, Guan JY, Zhao CC, Zhao QD, Ye BS (2012). Effects of environmental factors on the distribution of plant communities in a semi-arid region of the Qinghai-Tibet Plateau. *Ecological Research*, 27, 667–675.
- Wilbur HM (1976). Life history evolution in seven milkweeds of the genus *Asclepias*. *The Journal of Ecology*, 64, 223–240.
- Wu GL, Du GZ (2008). Relationships between seed size and seedling growth strategy of herbaceous plant: a review. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 19, 191–197. (in Chinese with English abstract) [武高林, 杜国祯 (2008). 植物种子大小与幼苗生长策略研究进展. 应用生态学报, 19, 191–197.]
- Wu GL, Du GZ, Shang ZH (2006). Contribution of seed size and its fate to vegetation renewal: a review. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 17, 1969–1972. (in Chinese with English abstract) [武高林, 杜国祯, 尚占环 (2006). 种子大小及其命运对植被更新贡献研究进展. 应用生态学报, 17, 1969–1972.]
- Yang T, Wang DX, Zhou JX (2009). Vegetation succession and species diversity dynamics of the plant communities in the loess hilly and gully region. *Journal of Northwest Forestry University*, 24(5), 10–15. (in Chinese with English abstract) [杨涛, 王得祥, 周金星 (2009). 陕北黄土丘陵沟壑区退耕地植物群落演替规律及物种多样性动态研究. 西北林学院学报, 24(5), 10–15.]

- Yin HJ, Cheng XY, Lai T, Lin B, Liu Q (2011). Seed rain, soil seed bank and seedling regeneration in a 65-year *Picea asperata* plantation in subalpine coniferous, western Sichuan, China. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 35, 35–44. (in Chinese with English abstract) [尹华军, 程新颖, 赖挺, 林波, 刘庆 (2011). 川西亚高山65年人工云杉林种子雨、种子库和幼苗定居研究. *植物生态学报*, 35, 35–44.]
- Zhang XY, Jiao JY, Wang N, Jia YF, Han LY (2010). Seed germination characteristics of 14 species in the hilly-gullied Loess Plateau of Northern Shaanxi. *Bulletin of Botanical Research*, 30, 604–611. (in Chinese with English abstract) [张小彦, 焦菊英, 王宁, 贾燕锋, 韩鲁艳 (2010). 陕北黄土丘陵沟壑区14种植物的萌发特性. *植物研究*, 30, 604–611.]
- Zhou P, Liu GB, Hou XL (2008). Study on soil physical and nutrients properties of different slope aspects and positions in eroded loess hilly region. *Journal of Soil and Water Conservation*, 22, 7–12. (in Chinese with English abstract) [周萍, 刘国彬, 侯喜禄 (2008). 黄土丘陵区侵蚀环境不同坡面及坡位土壤理化特征研究. *水土保持学报*, 22, 7–12.]
- Zhu YJ, Yang XJ, Carol CB, Jerry MB, Dong M, Huang ZY (2014). Effects of amount and frequency of precipitation and sand burial on seed germination, seedling emergence and survival of the dune grass *Leymus secalinus* in semi-arid China. *Plant and Soil*, 374, 399–409.
- Zong WJ, Liu K, Bu HY, Xu XL, Wu GL (2006). The mode of seed size variation and the effects of seed size on fifty-one species of Compositae plants in an alpine meadow. *Journal of Lanzhou University (Natural Sciences)*, 42(5), 52–55. (in Chinese with English abstract) [宗文杰, 刘坤, 卜海燕, 徐秀丽, 武高林 (2006). 高寒草甸51种菊科植物种子大小变异及其对种子萌发的影响研究. *兰州大学学报(自然科学版)*, 42(5), 52–55.]

特邀编委: 唐海萍 责任编辑: 王 葳