

陕北安塞不同林龄刺槐林下幼苗更新的动态变化特征

宗小天¹, 焦菊英^{1,2}, 吴多洋³, 寇萌⁴, 徐倩¹

(1.西北农林科技大学 水土保持研究所 黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 陕西 杨凌 712100;

2.中国科学院 水利部 水土保持研究所 黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 陕西 杨凌 712100;

3.陕西师范大学 西安 710000; 4.咸阳师范学院 资源环境与历史文化学院, 陕西 咸阳 712000)

摘 要:为了探讨黄土丘陵沟壑区刺槐林下幼苗更新的动态变化特征,进而为黄土高原地区人工刺槐林生态恢复与功能提升提供参考依据,在陕北安塞纸坊沟流域不同林龄(10 a, 20 a, 30 a, 40 a)的刺槐林下共设置 8 个典型样地作为研究对象,调查分析林下幼苗的物种组成、密度及月动态变化特征。结果表明:(1) 幼苗和地上植物间相似性系数表现为 10 a>20 a>40 a>30 a,都以菊科、禾本科、豆科为主,生活型以多年生草本和一年生草本植物为主。(2) 4—10 月间,不同林龄林下均有大量刺槐幼苗萌发;随林龄增加,林下幼苗更新过程各异,10 a 林以狗尾草、猪毛菜幼苗为主,20 a 林以猪毛菜、臭草、狗尾草、裂叶堇菜幼苗为主,30 a 林以长芒草、裂叶堇菜幼苗为主,40 a 林以翠雀、榆树幼苗为主。(3) 随林龄增加,幼苗物种数与密度均呈降低趋势;幼苗种类在 4 月、6 月、9 月较多;幼苗密度在 4 月和 6 月相对较高。(4) 林下草本植物幼苗大多数存活时间短;在刺槐林恢复初期(10 年),田旋花幼苗容易建植成功;在刺槐林恢复的中、后期(20 a, 30 a, 40 a),裂叶堇菜、臭草、长芒草幼苗容易建植成功。因此,在陕北黄土高原丘陵沟壑区,根据刺槐林的恢复时期及林下不同物种幼苗存活特性对幼苗进行合理地抚育管理,促进林下植被的恢复与更新。

关键词:刺槐; 林下植被; 幼苗更新; 物种组成

中图分类号:Q941

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2022)02-0287-09

Dynamic Characteristics of Seeding Regeneration in *Robinia pseudoacacia* Plantations with Different Ages in Ansai County of Northern Shaanxi Province

ZONG Xiaotian¹, JIAO Juying^{1,2}, WU Duoyang³, KOU Meng⁴, XU Qian¹

(1.State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau,

Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100,

China; 2.State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100, China; 3.Shaanxi Normal University, Xi'an 710000, China; 4.College of Resources & Environment and History & Culture, Xianyang Normal University, Xianyang, Shaanxi 712000, China)

Abstract:To explore dynamic characteristics of seeding regeneration in *Robinia pseudoacacia* plantations in the hilly-gully region of the Loess Plateau, and to provide reference for the ecological restoration and functions promotion of *Robinia pseudoacacia* plantation in the Loess Plateau region, 8 typical plots were selected to analyze the species composition, specie density in plantation and their monthly variation in different-aged *Robinia pseudoacacia* plantations(10 years, 20 years, 30 years, 40 years) in Zhifanggou watershed in Ansai County of Northern Shaanxi Province. The results showed that: (1) the order of similarity coefficient between seeding bank and ground vegetation decreased in the order: 10 years>20 years>40 years>30 years; *Compositae*, *Gramineae* and *Leguminosae* dominated the seedling bank and stand vegetation, while perennial herbaceous and annual herbaceous dominated the growth types; (2) from April to October, large amounts of

收稿日期:2020-12-25

修回日期:2021-03-03

资助项目:国家自然科学基金面上项目“黄土丘陵沟壑区流域泥沙连通性对降雨与人类活动的响应机制”(41771319),“黄丘区坡面退耕与淤地坝对坡沟系统侵蚀产沙的阻控机理”(41371280)

第一作者:宗小天(1993—),男,江西赣州人,硕士研究生,研究方向为林草生态工程。E-mail:zongxiaotian666@163.com

通信作者:焦菊英(1965—),女,陕西宝鸡人,研究员,主要从事土壤侵蚀和植被关系、水土保持环境效益评价研究。E-mail:jjyjjiao@ms.iswc.ac.cn

Robinia pseudoacacia seedlings germinated in undergrowth plantation of different ages; the regeneration process of undergrowth seedlings varied with the increase of forest age; *Setaria viridis* and *Salsola collina* were main seedling types in 10-year plantation, *Salsola collina*, *Melica scabrosa* and *Viola dissecta* were main seedling types in 20-year plantation, *Stipa bungeana* and *Viola dissecta* were main seedling types in 30-year plantation, and *Delphinium grandiflorum* and *Ulmus pumila* were main seedling types in 40-year plantation; (3) the number of seedling species and density of seedlings decreased with the increase of forest age; seedling species in April, June and September were more than those in other months; the higher seedling density was found in April and June. Thus, a proper management measures of seedlings according to the restoration period of *Robinia pseudoacacia* plantations and survival characteristics of different species are conducive to vegetation restoration and succession in the hill-gully region of the Loess Plateau.

Keywords: *Robinia pseudoacacia*; understory vegetation; seedling regeneration; species composition

幼苗是植被恢复演替过程的基础^[1],也是植物历史中对环境条件反映最敏感的时期^[2]。幼苗通常会参与到植物群落更新的过程中,影响未来植被的种类组成、结构、动态变化和物种多样性维持^[3-5],从而影响着植被恢复。由此可见,幼苗更新是植被生态恢复和植物群落演替过程极其关键的环节^[6],对植物种群的增殖、扩散、延续及稳定性维持具有极其重要的作用。因此,加强对幼苗的研究在一定程度上有助于了解植被恢复演替趋势,为生态脆弱区的植被恢复重建提供理论依据。迄今为止,许多学者对黄土高原地区幼苗已有大量研究并取得了重要进展,研究内容主要涉及幼苗的更新特性^[7-8]、幼苗生长影响因素^[9-10]、幼苗与周围植被的关系^[1,5,11-12]、幼苗的种群结构与空间分布格局^[13-14]。但前人的研究多是对幼苗进行定性描述或静态定量比较,缺乏对幼苗更新的动态变化研究^[15]。

陕北黄土丘陵沟壑区气候变化剧烈、地形地貌复杂,以及人类在该区不合理的土地利用方式,使其已成为水土流失最严重的地区之一,同时也是生态环境极其脆弱的地区之一^[16-17]。因此,中国于 20 世纪末在黄土高原大规模实施“退耕还林(草)”工程,用于防治黄土高原地区水土流失,改善脆弱的生态环境^[18-19]。植被恢复是生态环境建设的核心和退耕还林还草的关键^[20-21],可以有效地遏制土壤退化、促进退化生态系统恢复^[22-23]。研究表明人工林可通过次生演替恢复退化生态系统^[24]。其中,刺槐林是黄土高原地区植被恢复的主要人工林之一,因其较强的适应能力和抗逆能力得以在黄土高原广泛种植^[25]。但部分地区人工刺槐林却出现了林分退化、生长减缓、生态效益低、林下植被稀疏、树种单一等现象,导致黄土高原森林生态系统服务功能有下降的趋势^[26-27]。林下植被是人工林生态系统的重要组成部分,它能够通过促进上层林木更新、改良土壤、增强林地水文效

应、促进养分循环来维护人工林生态功能稳定性^[28]。林下幼苗是林下植被生长发育的基础,它的更新变化对人工林恢复和演替有着极其重要的作用。因此研究刺槐人工林恢复进程中林下幼苗更新的动态变化对营造一个健康刺槐人工林具有重要指导作用。目前关于刺槐林的研究大多集中在生理机能、土壤水分养分等方面^[10],对于人工刺槐林下幼苗的研究较少。鉴于此,本研究对陕北安塞纸坊沟流域不同林龄刺槐林下的幼苗进行跟踪观测,分析幼苗更新的动态变化特征,以期对黄土高原地区人工林生态系统恢复与生态功能的提升提供一定的理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于陕西省延安市安塞区(36°30'45"—37°19'3"N,108°5'44"—109°26'18"E)。该区属典型黄土丘陵沟壑区,地形地貌复杂多样,境内沟壑纵横,平均海拔约 1 372 m。气候类型属暖温带半干旱大陆性气候,年均温 8.8℃,年均降雨量 505 mm,降雨年内分布不均,其中 6—9 月雨季降水量占年降水量的 72.9%,年均无霜期 160 d^[29]。该区原始植被破坏严重,天然林较少,人工林以刺槐(*Robinia pseudoacacia*)、小叶杨(*Populus simonii*)、柠条锦鸡儿(*Caragana korshinskii*)、沙棘(*Hippophae rhamnoides*)为主,草本植物群落以细裂叶莲蒿(*Artemisia gmelinii*)、白羊草(*Bothriochloa ischaemum*)、长芒草(*Stipa bungeana*)为主^[30]。土壤类型以黄绵土为主,土质疏松,抗蚀抗冲能力较差^[31]。

1.2 样地选择与调查

于 2016 年 4 月,在陕北安塞纸坊沟流域内选取 4 个不同恢复年限的刺槐林(10 a, 20 a, 30 a, 40 a),每个林龄设置 2 个 10 m×10 m 的样地,共计 8 个样

地。在每个样地内设置 4 个 1 m×1 m 的固定小样方,对样方内的所有幼苗进行调查,并用竹签对幼苗进行标记。于 2016 年 7 月份调查样地的植被情况(表 1),包括植被盖度、郁闭度、地上植被物种组成等,同时记录样地的坡度、坡位等信息。

幼苗调查:即对一定面积的样地中调查样方内小于某一高度的所有植物幼苗进行调查。根据物种的生活型、高度等,将乔木物种高度小于 50 cm 的植物、灌木物种高度小于 40 cm、草本物种高度小于 10 cm 的植物作为幼苗;同时考虑物种特性,如地锦属于低矮草本植物,则将其高度小于 5 cm 的作为幼苗。于 2016 年 4—10 月,对小样方内的幼苗逐月跟踪调查,记录小样方内幼苗的物种组成、数量、生长状况及死亡情况等。在跟踪调查中,每月用不同颜色的竹签对幼苗进行标记,以区分不同调查时间幼苗的存活与萌发数量。

地上植被调查:在每个样地内设置 2 个 2 m×2 m 的小样方,进行地上植被调查,记录植被的盖度、物种组成。

表 1 样地基本情况

林龄/a	样地号	坡度/ (°)	坡向/ (°)	林冠 郁闭度/%	林下植被 盖度/%	林下 物种数/个
10	1	21.3	SE50	40	40.0	19
	2	29.3	SW55	45	10.0	17
20	3	25.3	SE65	42	9.8	11
	4	26.7	SW80	45	53.0	12
30	5	16.7	SE10	35	27.5	19
	6	30.7	NW65	35	17.6	11
40	7	31.3	SW80	44	58.3	13
	8	22.7	SW70	25	34.6	20

1.3 数据处理

(1) 采用相对多度和相对频度来计算不同幼苗物种的重要值,将重要值大于 5% 的物种作为主要物种^[26],计算方法如下:

幼苗重要值=(相对多度+相对频度)/2 (1)
式中:相对多度=(某物种的多度/所有物种的多度)×100%,相对频度=(某物种的频度/所有物种的频度)×100%

(2) 采用 Sorensen 相似性系数逐月计算不同林龄刺槐林样地内幼苗与地上物种间相似性,计算公式如下:

Sorensen 相似性系数(CC)=2C/(A+B) (2)
式中:C 为共有物种数;A 为幼苗物种数;B 为地上植被物种数。

采用 Excel 2019 软件整理调查数据,利用 SPSS

22.0 软件进行差异显著性分析(不同林龄幼苗的物种数、密度、幼苗与地上植被间相似性系数),显著水平为 $p<0.05$ 。

2 结果与分析

2.1 幼苗与地上植物的物种组成及相似性

在 4—10 月调查期间,共记录幼苗 48 种(10 a 林 25 种,20 a 林 28 种,30 a 林 24 种,40 a 林 23 种)(表 2),隶属于 20 科 39 属,其中菊科最多(17 种),禾本科(5 种)、豆科(4 种)次之,三科幼苗物种数占总物种数的 54.2%。多年生草本植物最多(25 种),占总物种数的 52.1%;一年生草本植物次之(12 种),占 24.9%;灌木(6 种)占 12.4%;乔木(3 种)占 6.3%;藤本(1 种)、二年生草本植物(1 种)各占 2.1%。

地上植物共记录 51 种(10 a 林 20 种,20 a 林 19 种,30 a 林 21 种,40 a 林 26 种)(表 2),隶属于 16 科 40 属,菊科、豆科、禾本科物种数占总物种数的 50% 以上。多年生草本植物(27 种)占总物种数的 52.9%;一年生草本植物(10 种)占 19.6%;灌木(8 种)占 15.7%;乔木(4 种)占 7.8%;藤本(1 种)、二年生草本植物(1 种)各占 2.0%。地上植物和幼苗的物种数类似,两者都是以菊科、禾本科、豆科为主;就生活型而言,二者物种组成都是以多年生草本为主、一年生草本次之。

不同林龄林下自然更新和生存的物种种类差异明显。10 a 林下幼苗与地上植物都存在的物种有 13 种,其中出现月份较多的物种有阿尔泰狗娃花、苦苣菜、猪毛菜、猪毛蒿、田旋花;仅在幼苗中存在且出现月份较多的物种有刺槐、狗尾草、败酱。20 a 林下幼苗与地上植物都存在的物种有 10 种,其中出现月份较多的物种有臭草、牻牛儿苗、裂叶堇菜;仅在幼苗中存在且出现月份较多的物种有阿尔泰狗娃花、刺槐、狗尾草、翠雀。30 a 林下幼苗与地上植物都存在的物种有 7 种,其中出现月份较多的物种有长芒草、裂叶堇菜;仅在幼苗中存在且出现月份较多的物种有刺槐、翠雀。40 a 林下幼苗与地上植物都存在的物种有 9 种,其中出现月份较多的物种有臭草、长芒草、裂叶堇菜、刺槐;仅在幼苗中存在且出现月份较多的物种有翠雀。

不同月份,林下幼苗与地上植物间相似性系数变化明显(表 3),不同林龄相似性系数变化范围分别为 0.17~0.56,0.23~0.50,0.08~0.40,0.20~0.38,说明幼苗与地上植物间相似性较小。总体表现为 10 a 林下幼苗与地上植物间相似性系数最大(0.40),其次是

20 a,40 a,30 a,分别为 0.32,0.29,0.24,30 a 显著小于其他林龄($p<0.01$)。从月变化趋势来看,10 a,下降(4—5 月)—上升(5—6 月)—下降(6—8 月)—上升(8—9 月)—下降(9—10 月),30 a 表现为下降(4—8 月)—上升(8—10 月)。

表 2 幼苗与地上植物组成

物种	10 a 刺槐林		20 a 刺槐林		30 a 刺槐林		40 a 刺槐林	
	地上植被	幼苗	地上植被	幼苗	地上植被	幼苗	地上植被	幼苗
阿尔泰狗娃花 <i>Heteropappus altaicus</i>	是	4,6—7,9	否	5,8—10	是	4,9—10	是	6,9—10
白花草木犀 <i>Melilotus albus</i>	是	否	否	否	否	否	否	否
抱茎小苦苣 <i>Ixeridium sonchifolium</i>	是	7—9	是	7—9	否	4—5	否	9
臭草 <i>Melica scabrosa</i>	是	6	是	4—7,9—10	是	5,9—10	是	4—6,8—10
风毛菊 <i>Saussurea japonica</i>	是	4—5,9	否	否	否	否	否	否
鬼针草 <i>Bidens pilosa</i>	是	4—6	否	否	否	否	否	否
中华小苦苣 <i>Ixeris chinensis</i>	是	8—9	否	4,9	否	4,10	否	7
苦苣菜 <i>Sonchus oleraceus</i>	是	4—5,7,9	否	9	否	4—5	否	否
蒲公英 <i>Taraxacum mongolicum</i>	是	否	否	否	否	否	否	否
刺儿菜 <i>Cirsium setosum</i>	是	4,8—9	否	否	否	8—9	否	否
早熟禾 <i>Poa annua</i>	是	否	否	否	否	否	否	4,6
猪毛菜 <i>Salsola collina</i>	是	4—6,9	是	4—6	是	4	是	否
猪毛蒿 <i>Artemisia scoparia</i>	是	4—8	否	4	否	否	是	否
糙隐子草 <i>Cleistogenes squarrosa</i>	是	9	否	否	否	否	否	否
臭蒿 <i>Artemisia hedinii</i>	是	4	否	9	否	4—5	是	否
杠柳 <i>Periploca sepium</i>	是	6	否	6—7	是	6	是	否
牻牛儿苗 <i>Erodium stephanianum</i>	是	5—6	是	4—8	否	否	是	5
田旋花 <i>Convolvulus arvensis</i>	是	4,6—7,9—10	是	否	是	4—5	是	否
硬质早熟禾 <i>Poa sphondylodes</i>	是	否	是	否	否	否	否	否
长芒草 <i>Stipa bungeana</i>	是	10	是	9—10	是	4—5,7,10	是	4—6,8
菊叶委陵菜 <i>Potentilla tanacetifolia</i>	否	6	否	否	否	6	否	否
赖草 <i>Leymus secalinus</i>	否	否	是	否	否	否	否	否
裂叶堇菜 <i>Viola dissecta</i>	否	否	是	4—10	是	4—10	是	4—5,7—8
茜草 <i>Rubia cordifolia</i>	否	否	是	6	是	否	是	4,9
中华隐子草 <i>Cleistogenes chinensis</i>	否	否	是	否	是	否	是	否
艾 <i>Artemisia argyi</i>	否	否	是	6	否	4	否	4,5
白羊草 <i>Bothriochloa ischaemum</i>	否	否	是	否	否	否	否	否
灰绿藜 <i>Chenopodium glaucum</i>	否	否	是	否	否	否	否	否
华北米蒿 <i>Artemisia giraldii</i>	否	否	是	4	否	否	是	否
蒙古蒿 <i>Artemisia mongolica</i>	否	否	是	4	否	否	否	4
细裂叶莲蒿 <i>Artemisia gmelinii</i>	否	否	是	4—5	是	4	是	4,7
香青兰 <i>Dracocephalum moldavica</i>	否	6—7	是	4	否	9	是	10
益母草 <i>Leonurus artemisia</i>	否	否	是	否	是	否	是	4
兴安胡枝子 <i>Lespedeza davurica</i>	否	4	否	否	是	5—6	是	5—6,8
地梢瓜 <i>Cynanchum thesioides</i>	否	否	否	6	是	9	否	否
延安小檗 <i>Berberis purdomii</i>	否	否	否	否	是	否	是	6—8
芦苇 <i>Phragmites australis</i>	否	否	否	否	是	否	否	否
麻花头 <i>Serratula centauroides</i>	否	4	否	否	是	否	否	否
茅莓 <i>Rubus parvifolius</i>	否	否	否	否	是	否	是	7
酸枣 <i>Ziziphus jujuba var. spinosa</i>	否	否	否	否	是	否	否	否

续表 2

物种	10 a 刺槐林		20 a 刺槐林		30 a 刺槐林		40 a 刺槐林	
	地上植被	幼苗	地上植被	幼苗	地上植被	幼苗	地上植被	幼苗
黑风藤 <i>Fissistigma polyanthum</i>	否	否	否	否	是	否	否	否
柳叶鼠李 <i>Rhamnus erythroxylon</i>	否	否	否	否	是	否	否	否
牛皮消 <i>Cynanchum auriculatum</i>	否	否	否	4—6	是	否	否	否
刺槐 <i>Robinia pseudoacacia</i>	否	5—10	否	5—10	否	5—10	是	5—10
胡桃 <i>Juglans regia</i>	否	否	否	否	否	否	是	否
杏 <i>Armeniaca vulgaris</i>	否	否	否	否	否	否	是	否
野菊 <i>Chrysanthemum indicum</i>	否	否	否	否	否	否	是	4,6
蓟 <i>Cirsium japonicum</i>	否	否	否	否	否	否	是	否
甘草 <i>Glycyrrhiza uralensis</i>	否	否	否	否	否	否	是	否
大针茅 <i>Stipa grandis</i>	否	否	否	否	否	否	是	否
远志 <i>Polygala tenuifolia</i>	否	7,9	否	否	否	否	是	否
狗尾草 <i>Setaria viridis</i>	否	5—9	否	4—7,10	否	5	否	否
翠雀 <i>Delphinium grandiflorum</i>	否	否	否	4,6—9	否	4—6,9	否	5—6,8—9
败酱 <i>Patrinia scabiosifolia</i>	否	6—10	否	否	否	否	否	否
榆树 <i>Ulmus pumila</i>	否	否	否	否	否	否	否	6,8,9
臭椿 <i>Ailanthus altissima</i>	否	否	否	否	否	否	否	6
鹤虱 <i>Lappula myosotis</i>	否	否	否	否	否	9—10	否	4,5,8
龙葵 <i>Solanum nigrum</i>	否	否	否	否	否	6	否	否
黄花蒿 <i>Artemisia annua</i>	否	否	否	8,10	否	否	否	否
野豌豆 <i>Vicia sepium</i>	否	否	否	4,6	否	否	否	否
二裂委陵菜 <i>Potentilla bifurca</i>	否	否	否	5	否	4	否	否
地锦 <i>Euphorbia humifusa</i>	否	8	否	否	否	否	否	否
草木樨状黄耆 <i>Astragalus melilotoides</i>	否	否	否	5	否	否	否	否
互叶醉鱼草 <i>Buddleja alternifolia</i>	否	否	否	6	否	否	否	否

注:“是”表示存在幼苗或地上植物中,“否”表示不存在幼苗或地上植物中,阿拉伯数字表示该物种出现的月份。

表 3 幼苗与地上植被间相似性系数

林龄/a	相似性系数							
	4 月	5 月	6 月	7 月	8 月	9 月	10 月	平均值±标准差
10	0.56	0.37	0.48	0.39	0.29	0.54	0.17	0.40 ±0.14A
20	0.50	0.33	0.36	0.30	0.23	0.27	0.23	0.32 ±0.09A
30	0.40	0.26	0.21	0.17	0.08	0.28	0.29	0.24 ±0.10B
40	0.38	0.28	0.36	0.25	0.24	0.34	0.20	0.29 ±0.07A

注:不同大写字母表示不同林龄之间的平均值达到显著水平($p<0.05$)。

2.2 幼苗物种组成的月动态变化

由表 4 看出,在 10 a 刺槐林下,4 月幼苗主要有猪毛菜、苦苣菜、刺儿菜、鬼针草、兴安胡枝子等;5 月调查时,猪毛蒿、刺儿菜、兴安胡枝子幼苗大量死亡,狗尾草大量萌发,幼苗主要有鬼针草、狗尾草、猪毛菜、苦苣菜、风毛菊等;6 月狗尾草、猪毛菜、苦苣菜幼苗大量死亡,刺槐、杠柳幼苗萌发较多,幼苗主要有鬼针草、刺槐、杠柳、牻牛儿苗等;7 月远志、狗尾草、香青兰开始萌发,幼苗主要有刺槐、远志、狗尾草、香青兰、阿尔泰狗娃花等;到 8 月时,香青兰大量死亡,败酱、抱茎小苦荬、猪毛蒿开始

萌发,幼苗主要有刺槐、败酱、抱茎小苦荬、猪毛蒿、狗尾草等;9 月幼苗更新达到高峰,主要物种有刺儿菜、刺槐、抱茎小苦荬、败酱等;10 月幼苗大量死亡,仅有败酱、刺槐、长芒草和田旋花 4 种幼苗存活。
20 a 刺槐林下,4 月幼苗主要有猪毛菜、裂叶堇菜、细裂叶莲蒿、牻牛儿苗等;5 月猪毛菜大量死亡,草木樨状黄耆、狗尾草等幼苗开始萌发,幼苗主要有裂叶堇菜、细裂叶莲蒿、牻牛儿苗、草木樨状黄耆、狗尾草等;6 月刺槐幼苗大量萌发,同时臭草、翠雀、杠柳开始萌发,主要幼苗有刺槐、裂叶堇菜、臭草、翠雀

等;7月抱茎小苦蕒开始萌发,主要幼苗有刺槐、翠雀、裂叶堇菜、抱茎小苦蕒、臭草等;8月和7月类似,但臭草死亡较多,有新物种黄花蒿开始萌发;9月刺槐幼苗死亡较多,狗尾草、臭草、阿尔泰狗娃花开始萌发,主要幼苗有抱茎小苦蕒、裂叶堇菜、狗尾草、刺槐、臭草、阿尔泰狗娃花等;到了10月份,有大量幼苗死亡,幼苗主要是臭草、刺槐、裂叶堇菜、狗尾草、阿尔泰狗娃花、长芒草、黄花蒿。

30 a 刺槐林下,4月主要幼苗有裂叶堇菜、长芒草、翠雀、臭蒿、阿尔泰狗娃花、细裂叶莲蒿等;5月裂叶堇菜大量死亡,刺槐、苦苣菜、兴安胡枝子、狗尾草幼苗出现,主要幼苗有刺槐、长芒草、翠雀、苦苣菜、兴安胡枝子等;6月裂叶堇菜重新萌发,又有杠柳、龙葵开始萌发,幼苗主要有裂叶堇菜、刺槐、杠柳、龙葵、翠雀等;7月大量幼苗死亡,仅有裂叶堇菜、长芒草存活;8月有刺槐、鹤虱、裂叶堇菜、刺儿菜幼苗萌发;9月主要幼苗有裂叶堇菜、刺槐、臭草等;10月长芒草大量萌发,主要幼苗有长芒草、裂叶堇菜、鹤虱、刺槐等。

40 a 刺槐林下,4月幼苗主要有野菊、艾、臭草、裂叶堇菜、蒙古蒿、长芒草等;5月刺槐、翠雀幼苗开始萌发,主要有臭草、长芒草、艾、裂叶堇菜、刺槐、翠雀等;6月刺槐、翠雀大量萌发,榆树、臭椿幼苗开始萌发,幼苗主要有刺槐、翠雀、榆树、臭椿、裂叶堇菜等;7月翠雀、榆树、臭椿幼苗大量死亡,幼苗主要有茅莓、刺槐、延安小檗、裂叶堇菜、细裂叶莲蒿、中华小苦蕒等;8月翠雀、榆树幼苗重新萌发,幼苗主要有翠雀、刺槐、榆树、延安小檗、臭草、鹤虱等;9月主要幼苗是刺槐、臭草、长芒草、茜草、野菊等;10月幼苗大量死亡,仅有臭草、阿尔泰狗娃花、香青兰、刺槐等幼苗存活。

从4—10月出现的幼苗种类来看,10 a 林以刺槐、狗尾草、猪毛菜为主,幼苗数量分别占幼苗总数的26.3%,17.5%,10.9%;20 a 林以猪毛菜、刺槐、臭草、狗尾草、裂叶堇菜为主,幼苗数量分别占幼苗总数的14.8%,15.4%,13.1%,11.4%,10.6%;30 a 林以裂叶堇菜、长芒草、刺槐为主,幼苗数量分别占幼苗总数的30.5%,16.9%,14.8%;40 a 林以刺槐、翠雀、苦苣菜为主,幼苗数量分别占幼苗总数的26.4%,10.6%,10.2%。可以看出,不同林龄林下幼苗中均有大量刺槐幼苗萌发,随林龄的增加,其他主要幼苗发生明显变化,依次为狗尾草、猪毛菜→猪毛菜、臭草、狗尾草、裂叶堇菜→长芒草、裂叶堇菜→翠雀、榆树(表5)。

2.3 幼苗物种数和幼苗密度的月动态变化

2.3.1 幼苗物种数月动态变化 刺槐林下幼苗物种数的月动态变化存在差异(表6)。在10 a 刺槐林中,6月幼苗物种数最多,10月最低;4月、6月、9月幼苗

物种数显著高于5月、10月($p < 0.05$)。20 a 刺槐林中,4月、6月、9月幼苗物种数较高,其中6月幼苗物种数显著高于10月($p < 0.05$)。30 a 刺槐林中,4月、6月、10月幼苗物种数相对较高且显著高于7月、8月($p < 0.05$)。40 a 刺槐林中,4月、5月、6月、9月存活的幼苗种类显著高于7月、10月($p < 0.05$)。可以看出,在不同林龄刺槐林下,4月、6月、9月幼苗物种数均较高,但30 a 刺槐林下幼苗种类在10月也较多。随林龄增加,幼苗物种数呈降低趋势,其中10 a 林幼苗物种数显著大于40 a 林($p < 0.05$)。

2.3.2 幼苗密度的月动态变化 刺槐林下幼苗密度的月动态变化存在差异(表7)。10 a 刺槐林中,4月幼苗密度最高,10月幼苗密度最低;4月、6月、7月幼苗密度较高且显著高于5月、9月、10月($p < 0.05$)。20 a 刺槐林中,9月幼苗密度最高,4—8月幼苗密度呈降低趋势;10月幼苗密度显著低于9月($p < 0.05$)。30 a 刺槐林中,4月、6月、10月幼苗密度相对较高;7月、8月幼苗密度显著低于4月份($p < 0.05$)。40 a 刺槐林中,6月幼苗密度显著高于其他月份($p < 0.05$)。可见,在不同林龄刺槐林下,4月、6月幼苗密度相对较高;除30 a 刺槐林外,其他林龄林下10月幼苗密度均最低。随林龄增加,幼苗密度呈降低趋势,其中10 a,20 a 林幼苗平均密度显著大于30 a,40 a 林($p < 0.05$)。

2.4 幼苗更新能力和存活能力

由表2可知,不同林龄5—10月均有刺槐幼苗出现,存活时间较长,是刺槐林下优势物种。裂叶堇菜幼苗在20 a,30 a 刺槐林下4—10月均有出现,在40 a 刺槐林下4月、5月、7月、8月出现,说明在刺槐林恢复中期裂叶堇菜有着很强的更新和存活能力。田旋花幼苗在10 a 刺槐林下出现频率较高,但在20 a,30 a,40 a 刺槐林下极少出现,说明在刺槐林恢复初期其更新能力较强。臭草幼苗在20 a,30 a,40 a 刺槐林下出现频率较高,说明在刺槐林恢复中、后期臭草有着很强的更新和存活能力。长芒草幼苗在30 a,40 a 刺槐林下存活时间长,同时随着林龄的增加,长芒草在刺槐林下4—10月出现频率增加,说明随林龄增加,长芒草的自然更新和存活能力增强。猪毛菜幼苗在10 a,20 a 刺槐林4月大量萌发但随后很快死亡;风毛菊、苦苣菜、猪毛蒿幼苗几乎只存活在10 a 刺槐林下,在4月、5月,7—9月偶尔出现;抱茎小苦蕒主要在10 a,20 a 刺槐林下7—9月开始萌发,且在出苗后的2个月左右全部死亡;鬼针草主要存活在10 a 刺槐林中,4月少量萌发,5月、6月大量萌发,但在7月全部死亡;阿尔泰狗娃花、刺儿菜、远志、败酱、翠雀、杠柳、艾、麻头花、糙隐子草、蒙古蒿等在出苗1—2月内死亡;这些幼苗存活时间较短,难以成功建植。

表 4 刺槐林下幼苗物种组成月动态变化

林龄/a	月份	物种(重要值/%)
10	4	猪毛菜(31.0),苦苣菜(14.1),刺儿菜(14.1),鬼针草(8.3),猪毛蒿(7.7),兴安胡枝子(5.9),阿尔泰狗娃花(4.1),风毛菊(3.0),麻花头(3.0),田旋花(3.0),臭草(3.0),狗尾草(3.0)
	5	鬼针草(32.5),狗尾草(26.8),猪毛菜(11.2),苦苣菜(8.4),风毛菊(7.0),牻牛儿苗(7.0),刺槐(7.0)
	6	鬼针草(31.1),刺槐(21.1),杠柳(8.0),牻牛儿苗(5.4),败酱(5.4),臭草(4.1),猪毛蒿(3.3),香青兰(2.9),菊叶委陵菜(2.9),猪毛菜(2.5),阿尔泰狗娃花(2.5),田旋花(2.5)
	7	刺槐(41.1),远志(11.0),狗尾草(10.7),香青兰(7.3),阿尔泰狗娃花(7.3),抱茎小苦荬(5.1),败酱(4.0),苦苣菜(3.4),猪毛菜(3.4),田旋花(3.4)
	8	刺槐(32.0),败酱(22.7),抱茎小苦荬(12.5),猪毛蒿(9.0),狗尾草(7.9),中华小苦荬(7.9),地锦(3.9),刺儿菜(3.9)
	9	刺儿菜(18.5),刺槐(14.5),抱茎小苦荬(11.6),败酱(10.4),猪毛菜(9.1),阿尔泰狗娃花(7.7),远志(5.2),狗尾草(3.9),风毛菊(3.9),苦苣菜(3.9),糙隐子草(3.9),田旋花(3.9),中华小苦荬(3.9)
	10	败酱(40.0),刺槐(26.7),长芒草(21.7),田旋花(11.7),
	4	猪毛菜(44.4),裂叶堇菜(10.8),细裂叶莲蒿(9.3),牻牛儿苗(5.0),臭草(3.8),翠雀(3.8),蒙古蒿(3.8),野豌豆(3.2),猪毛蒿(3.2),狗尾草(3.2),香青兰(3.2),牛皮消(3.2),华北米蒿(3.2)
	5	裂叶堇菜(26.5),细裂叶莲蒿(22.5),牻牛儿苗(9.0),草木樨状黄耆(9.0),狗尾草(6.5),中华小苦荬(5.7),猪毛菜(4.1),臭草(4.1),二裂委陵菜(4.1),阿尔泰狗娃花(4.1),刺槐(4.1)
	6	刺槐(20.5),裂叶堇菜(16.0),臭草(12.2),翠雀(9.4),狗尾草(7.5),杠柳(7.0),艾(4.2),野豌豆(3.3),牻牛儿苗(3.3),地梢瓜(3.3),互叶醉鱼草(3.3),猪毛菜(3.3),茜草(3.3),牛皮消(3.3)
20	7	刺槐(22.8),翠雀(22.0),裂叶堇菜(17.4),抱茎小苦荬(14.7),臭草(8.5),杠柳(5.0),狗尾草(5.0),牻牛儿苗(5.0)
	8	刺槐(34.0),翠雀(17.0),裂叶堇菜(17.0),抱茎小苦荬(14.7),黄花蒿(6.2),牻牛儿苗(6.2),阿尔泰狗娃花(5.0)
	9	抱茎小苦荬(17.0),裂叶堇菜(16.4),狗尾草(12.2),刺槐(10.1),臭草(8.0),阿尔泰狗娃花(8.0),臭蒿(7.4),中华小苦荬(6.3),翠雀(5.8),苦苣菜(4.8),长芒草(3.7)
	10	臭草(23.6),刺槐(19.4),裂叶堇菜(13.9),狗尾草(9.7),阿尔泰狗娃花(9.7),长芒草(9.7),黄花蒿(9.7)
	4	裂叶堇菜(20.9),长芒草(16.9),翠雀(15.4),臭蒿(7.8),阿尔泰狗娃花(7.1),细裂叶莲蒿(5.6),猪毛菜(4.2),臭草(4.2),中华小苦荬(3.5),二裂委陵菜(2.9),田旋花(2.9),艾(2.9),苦苣菜(2.9),抱茎小苦荬(2.9)
	5	刺槐(23.0),长芒草(15.6),翠雀(10.7),苦苣菜(10.4),兴安胡枝子(7.0),狗尾草(7.0),臭蒿(5.2),田旋花(5.2),抱茎小苦荬(5.2)
	6	裂叶堇菜(36.0),刺槐(22.0),杠柳(12.9),龙葵(12.0),翠雀(8.6),兴安胡枝子(4.3),菊叶委陵菜(4.3)
	7	裂叶堇菜(80.0),长芒草(20.0)
	8	刺槐(52.3),鹤虱(17.4),裂叶堇菜(17.4),刺儿菜(12.9)
	9	裂叶堇菜(32.6),刺槐(30.5),臭草(9.0),阿尔泰狗娃花(5.6),香青兰(5.6),刺儿菜(5.6),地梢瓜(5.6),翠雀(5.6)
30	10	长芒草(40.9),裂叶堇菜(13.9),鹤虱(13.9),刺槐(9.7),臭草(8.8),中华小苦荬(8.5),阿尔泰狗娃花(4.3)
	4	野菊(17.7),艾(16.1),臭草(11.9),裂叶堇菜(11.3),蒙古蒿(7.7),益母草(7.7),长芒草(7.7),茜草(5.0),鹤虱(5.0),细裂叶莲蒿(5.0),早熟禾(5.0)
	5	臭草(18.5),长芒草(18.5),艾(14.0),裂叶堇菜(11.7),刺槐(11.7),翠雀(8.1),牻牛儿苗(5.8),鹤虱(5.8),兴安胡枝子(5.8)
	6	刺槐(31.0),翠雀(16.5),榆树(14.8),臭椿(8.8),裂叶堇菜(6.2),臭草(3.6),长芒草(3.6),野菊(3.1),延安小檗 3.1),早熟禾(3.1),阿尔泰狗娃花(3.1),兴安胡枝子(3.1)
	7	茅莓(30.0),刺槐(22.8),延安小檗(16.5),裂叶堇菜(10.3),细裂叶莲蒿(10.3),中华小苦荬(10.3)
	8	翠雀(21.1),刺槐(15.6),榆树(13.3),延安小檗(13.3),臭草(10.1),鹤虱(10.1),裂叶堇菜(7.8),兴安胡枝子(7.8)
	9	刺槐(28.0),臭草(14.7),长芒草(14.7),茜草(12.7),野菊(9.6),榆树(5.1),阿尔泰狗娃花(5.1),抱茎小苦荬(5.1),翠雀(5.1)
	10	臭草(32.5),阿尔泰狗娃花(22.5),香青兰(22.5),刺槐(22.5)

注:重要值>5%的物种视为主要物种。

3 讨论与结论

(1) 幼苗和地上植物都以菊科、禾本科、豆科为

主;物种组成都是以多年生草本为主,一年生草本次之;这与白文娟等在黄土丘陵沟壑区的研究结果一致^[32]。幼苗与地上植被间相似性系数基本在 0.5 以

下,说明幼苗与地上植被间相似性较小。造成这种现象的因素是多方面的。第一,部分地上植被的种子未能进入种子库中^[33];第二,黄土丘陵沟壑区土壤侵蚀严重,土壤水分、养分均较低,地上植被的种子进入土壤种子库后在萌发成幼苗前就已经死亡^[32];此外物种生活特性^[34]、优势物种与林下植物的的竞争作用等^[5]也会对幼苗与地上植物的相似性产生一定影响。

(2) 不同林龄林下幼苗中均有刺槐幼苗萌发,随林龄增加,其他主要幼苗种类差异明显。这种差异性可能与地上植被组成^[44]以及物种生物学特性有关。

表 5 幼苗主要物种及其所占幼苗总数的比例

10 a 刺槐林		20 a 刺槐林		30 a 刺槐林		40 a 刺槐林	
主要物种	比例/%	主要物种	比例/%	主要物种	比例/%	主要物种	比例/%
刺槐	26.3	猪毛菜	15.4	裂叶堇菜	30.5	刺槐	26.4
狗尾草	17.5	刺槐	14.1	长芒草	16.9	翠雀	10.6
猪毛菜	10.9	臭草	13.1	刺槐	14.8	榆树	10.2
鬼针草	7.3	狗尾草	11.4	翠雀	8.2	臭草	9.4
刺儿菜	6.4	裂叶堇菜	10.6	臭草	4.5	长芒草	6.4
败酱	6.2	抱茎小苦荬	9.3	龙葵	3.7	臭椿	5.5
苦苣菜	3.8	翠雀	7.6	阿尔泰狗娃花	2.5	艾	5.1
远志	3.8	阿尔泰狗娃花	3.3	臭蒿	2.5	野菊	4.3
抱茎小苦荬	3.1	牻牛儿苗	2.8	鹤虱	2.5	裂叶堇菜	3.8
猪毛蒿	2.8	细裂叶莲蒿	2.0	细裂叶莲蒿	2.1	茜草	3.0
阿尔泰狗娃花	2.1	杠柳	1.5	中华小苦荬	1.6	延安小檗	3.0
臭草	1.2	中华小苦荬	1.3	猪毛菜	1.2	茅莓	2.1
香青兰	1.2	苦苣菜	1.0	苦苣菜	1.2	鹤虱	1.7
田旋花	1.2	臭蒿	1.0	杠柳	1.2	阿尔泰狗娃花	1.3
其他物种	6.2	其他物种	5.6	其他物种	6.6	其他物种	7.2
总计	100	总计	100	总计	100	总计	100

表 6 幼苗物种数月动态变化

林龄/a	幼苗物种数/个							
	4 月	5 月	6 月	7 月	8 月	9 月	10 月	平均值
10	5.25 ±0.96c	2.20 ±0.96ab	6.00 ±1.83c	4.50 ±2.38bc	4.50 ±1.73bc	5.00 ±1.41c	1.50 ±1.73a	4.14 ±2.12A
20	4.75 ±1.71ab	3.75 ±0.50ab	5.25 ±0.96b	3.25 ±1.50ab	3.25 ±1.26ab	4.75 ±1.50ab	2.25 ±2.63a	3.89 ±1.71AB
30	5.67 ±3.21c	3.75 ±1.71bc	3.75 ±1.26bc	1.00 ±0.82a	1.50 ±1.29ab	3.25 ±0.96abc	4.00 ±1.41bc	3.29 ±2.03AB
40	3.50 ±2.38ab	3.50 ±1.73ab	4.75 ±1.89b	1.75 ±1.71a	2.50 ±1.29ab	3.50 ±0.58ab	1.00 ±1.41a	2.93 ±1.98B

注:数据为平均值±标准差;不同大写字母表示不同林龄之间的平均值达到显著水平($p<0.05$),不同小写字母表示同一林龄下不同月份间达到显著水平($p<0.05$)。下同。

表 7 幼苗密度月动态变化

林龄/a	幼苗密度/(个·m ⁻²)							
	4 月	5 月	6 月	7 月	8 月	9 月	10 月	平均值
10	21.5 ±10.88bc	8.75 ±6.95a	30.25 ±7.63c	21.25 ±9.29bc	10.75 ±4.11ab	9.25 ±6.08a	3.75 ±4.50a	15.07 ±11.01A
20	21.75 ±17.93ab	15.75 ±13.20ab	13.50 ±6.02ab	10.75 ±5.73ab	10.75 ±4.11ab	23.50 ±11.48b	3.00 ±3.46a	14.14 ±11.15A
30	18.25 ±11.30b	6.75 ±4.35ab	13.00 ±12.38ab	1.75 ±1.50a	2.75 ±2.06a	7.25 ±4.64ab	11.00 ±8.16ab	8.68 ±8.61B
40	9.00 ±5.94a	5.50 ±2.08a	26.25 ±22.73b	4.00 ±3.74a	4.50 ±2.38a	8.25 ±0.96a	1.25 ±1.89a	8.39 ±11.21B

注:数据为平均值±标准差;不同大写字母表示不同林龄之间的平均值达到显著水平($p<0.05$),不同小写字母表示同一林龄下不同月份间达到显著水平($p<0.05$)。

Maranon 等^[35]研究表明地上植被与土壤种子库有着密切联系,而幼苗更新的基础是土壤种子库^[4]。如 10 a 刺槐林下,猪毛菜、苦苣菜、鬼针草等地上植物提供的种子在 4—5 月大量萌发;20 a,30 a,40 a 刺槐林下裂叶堇菜、臭草存在地上植物中,为土壤种子库提供种子,这两种幼苗在刺槐林恢复中,后期有着较强的更新与存活能力。同时不同林龄刺槐郁闭度、植被密度不相同,也会影响到林下幼苗的生长环境,如林下光照的分布、温度及土壤水分等随林龄发生变化^[29],对林下幼苗的生长更新有着一定的影响。

(3) 不同林龄林下幼苗物种数、密度的月动态变化存在差异。幼苗物种数在4月、6月、9月幼苗物种数较高;幼苗密度在4月、6月幼苗密度相对较高。幼苗物种数、密度的动态变化与气温、降雨、幼苗特性有着密切关系。安塞4—5月降雨和温度较低,利于狗尾草、鬼针草等幼苗的萌发^[36-37],但低温、低降雨量也导致猪毛菜、苦苣菜等幼苗大量死亡,因此幼苗物种数、密度均较低;6月温度、降雨量有所回升,适宜林下幼苗如刺槐、裂叶堇菜、翠雀等萌发生长,幼苗物种数、密度较高;7月、8月气温达到高峰,虽然此时降雨量也高,但是地上植被生长旺盛,蒸腾作用强,幼苗之间竞争剧烈,不利于种子萌发和幼苗生长,幼苗物种数和密度较低;9月降雨减小,光照强烈,不利于大部分幼苗的萌发、存活,但也有翠雀、榆树、阿尔泰狗娃花等幼苗出现,故幼苗物种数较高而幼苗密度较小;10月气温、降雨均低,不利于幼苗的萌发与生长,故幼苗物种数、密度较低。不同林龄刺槐林下幼苗物种数、幼苗密度均表现为随林龄增加而呈减小趋势,这可能与刺槐林郁闭度有关。林冠郁闭度显著影响林下光照的分布^[38],10 a,20 a刺槐林郁闭度较高,林下光照较弱,降低水分的蒸发,有利于幼苗的萌发,因此幼苗物种数、密度高于30 a,40 a。

(4) 幼苗存活、建植成功是幼苗更新及植物群落更新过程的关键环节^[39]。本研究发现林下草本植物幼苗大多数存活时间较短,难以成功建植。在刺槐林恢复初期,田旋花幼苗易成功建植;在刺槐林恢复的中、后期,裂叶堇菜、臭草、长芒草幼苗成功建植;且这些建植成功的幼苗物种也存在于地上植物中。因此,在人工刺槐林植被恢复过程中,要营造健康发育的人工林及维持其可持续性,需充分考虑林下幼苗的更新以及是否能够成功建植,采取相应的林地抚育管理措施,提高幼苗的存活种类与密度,促进人工林的自然恢复,这样才能有利于该区植被的恢复和生态环境的改善。如在刺槐林恢复前期,应通过调节林地郁闭度、栽植密度改善水热条件,提高田旋花、猪毛菜、猪毛蒿、鬼针草等以种子繁殖为主的物种种子的萌发率及幼苗的存活能力^[40]。

参考文献:

- [1] 苏娜,焦菊英,王巧利,等.黄土丘陵沟壑区不同侵蚀环境下幼苗库及其与地上植被的关系[J].草业学报,2013,22(5):154-164.
- [2] 彭闪江,黄忠良,彭少麟,等.植物天然更新过程中种子和幼苗死亡的影响因素[J].广西植物,2004,24(2):113-121,124.
- [3] Hector G S, Josep E, Sans F X. Factors that limit the emergence and establishment of the related aliens *Senecio inaequidens* and *Senecio pterophorus* and the native *Senecio malacitanus* in Mediterranean climate[J]. Canadian Journal of Botany, 2004,82(9):1346-1355.
- [4] 程积民,万惠娥,胡相明.黄土高原草地土壤种子库与草地更新[J].土壤学报,2006,43(4):679-683.
- [5] 葛芳红,刘红岩,赵富王,等.黄土丘陵区植物间正相互作用对幼苗更新的影响[J].草业学报,2019,28(10):134-143.
- [6] 陈圣宾,宋爱琴,李振基.森林幼苗更新对光环境异质性的响应研究进展[J].应用生态学报,2005,16(2):365-370.
- [7] 田丽,王孝安,郭华,等.黄土高原马栏林区辽东栎更新特性研究[J].广西植物,2007,27(2):191-196.
- [8] 崔长美,王孝安,郭华,等.黄土高原天然柴松纯林不同坡位幼苗更新特性研究[J].中国农学通报,2011,27(4):48-52.
- [9] 郑维娜,王孝安,郭华,等.微生境对辽东栎幼苗生长的影响[J].干旱区研究,2013,30(6):1049-1055.
- [10] 安玉艳,梁宗锁,韩蕊莲,等.土壤干旱对黄土高原3个常见树种幼苗水分代谢及生长的影响[J].西北植物学报,2007,27(1):91-97.
- [11] Hu S, Jiao J Y, Li Y, et al. Seedling and ramet recruitment at the community level on recent landslide scars on the hilly and gullied Loess Plateau, China[J]. Land Degradation & Development, 2020,31(2):168-180.
- [12] 袁航,侯扶江.黄土高原3种建群种植物枯落物对苜蓿幼苗生长的化感作用[J].草业科学,2010,27(6):20-24.
- [13] 范玮熠,郭华,王孝安,等.子午岭辽东栎幼苗及其微生境的空间格局[J].生态学杂志,2013,32(10):2672-2678.
- [14] 田丽,王孝安,郭华,等.黄土高原马栏林区优势种幼苗与其种群级结构的演替研究[J].西北植物学报,2006,26(12):2560-2566.
- [15] 郭华,王孝安,王世雄,等.黄土高原子午岭辽东栎(*Quercus liaotungensis*)幼苗动态生命表及生存分析[J].干旱区研究,2011,28(6):1005-1010.
- [16] 王国梁,刘国彬,刘芳,等.黄土沟壑区植被恢复过程中植物群落组成及结构变化[J].生态学报,2003,23(12):2550-2557.
- [17] Chen F L. Agricultural landscape spatial pattern analysis in the semi-arid hill area of the Loess Plateau, China[J]. Journal of Arid Environments, 2000,44(3):291-303.
- [18] 马岩,陈利顶,虎陈霞.黄土高原地区退耕还林工程的农户响应与影响因素:以甘肃定西大牛流域为例[J].地理科学,2008,28(1):34-39.
- [19] 王丹丹,吴普特,赵西宁.黄土高原退耕还林(草)效益评价研究进展[J].西北林学院学报,2010,25(3):223-228.
- [20] 张健,刘国彬.黄土丘陵区不同植被恢复模式对沟谷地植物群落生物量和物种多样性的影响[J].自然资源学报,2010,25(2):207-217.

平均气温变化[J].科学通报,2014,59(15):1446-1458.

[17] 宋慧明,刘禹,倪万眉,等.以树轮宽度重建九寨沟 1750 年以来冬半年平均最低温度[J].第四纪研究,2007,27(4):486-491.

[18] 李金建,李媛媛,秦宁生,等.利用树木年轮重建川西松潘高原 5 月降水变化特征[J].高原气象,2013,32(4):1195-1202.

[19] 高由禧,郭其蕴.我国的秋雨现象[J].气象学报,1958,29(4):264-273.

[20] 白虎志,董文杰.华西秋雨的气候特征及成因分析[J].高原气象,2004,23(6):884-889.

[21] 卢鋈.川康边区之雨量[J].气象学报,1942,16(Z1):23-35.

[22] Zhu Z, Lu R, Yan H, et al. The dynamic origin of the interannual variability of West China autumn rainfall[J]. Journal of Climate, 2020,33(22),9643-9652.

[23] 王春学,马振峰,张顺谦,等.华西秋雨逐日监测指数的建立及其分析[J].气象,2014,40(8):957-964.

[24] 蒋竹将,马振峰,刘佳,等.一种改进的华西秋雨指数及其气候特征[J].大气科学,2014,38(1):32-44.

[25] 王春学,马振峰,王佳津,等.华西秋雨准 4 年周期特征及其与赤道太平洋海表温度的关系[J].大气科学,2015,39(3):643-652.

[26] Liu J, Zhao P G, Ma Z F, et al. Variability of inter-annual relationship between indian ocean dipole and Huaxi Region's autumn precipitation[J]. Journal of Tropical Meteorology,2019,25(4):498-518.

[27] Yang F M, Wang N A, Shi F, et al. The spatial distribution of precipitation over the West Qinling region, China, AD 1470—2000[J]. Palaeogeography Palaeoclimatology Palaeoecology,2016,443:278-285.

[28] 张萍.明清时期岷江流域水旱灾害初步研究[D].重庆:西南大学,2014.

[29] 四川省人民政府救灾办公室.四川灾害对策[M].成都:四川科学技术出版社,1993.

[30] 温克刚,詹兆渝.中国气象灾害大典:四川卷[M].北京:气象出版社,2005.



(上接第 295 页)

[21] 任洪玉,温仲明,杨勤科.黄土沟壑区植被恢复及其物种多样性的变化:以吴旗县植被恢复为例[J].干旱地区农业研究,2003,21(2):154-158.

[22] 任海,彭少麟,陆宏芳.退化生态系统恢复与恢复生态学[J].生态学报,2004,24(8):1760-1768.

[23] 郑粉莉.子午岭林区植被破坏与恢复对土壤演变的影响[J].水土保持通报,1996,16(5):41-44.

[24] Seemen H, Laitamm H, Pikk J. The influence of nutritional conditions on forest-soil microflora [J]. Baltic Forestry,1988,4(1):2-7.

[25] 王力,邵明安,李裕元.陕北黄土高原人工刺槐林生长与土壤干化的关系研究[J].林业科学,2004,41(1):84-91.

[26] 朱朵菊.刺槐对黄土丘陵区植物群落结构与功能的影响[D].陕西杨凌:西北农林科技大学,2018.

[27] 韦景树,李宗善,冯晓巧,等.黄土高原人工刺槐林生长衰退的生态生理机制[J].应用生态学报,2018,29(7):2433-2444.

[28] 马祥华,焦菊英.黄土高原植被恢复与土壤环境相互作用研究进展[J].水土保持研究,2004,11(4):157-161.

[29] 吴多洋,焦菊英,于卫洁.陕北安塞退耕恢复 15 年刺槐林与自然植被的物种组成与群落特征[J].水土保持研究,2017,24(4):12-18,26.

[30] 吴芳,陈云明,于占辉.黄土高原半干旱区刺槐生长盛期树干液流动态[J].植物生态学报,2010,34(4):469-476.

[31] 刘海威,张少康,焦峰.黄土丘陵区不同退耕年限草地群落特征及其土壤水分养分分效应[J].草业学报,2016,25(10):31-39.

[32] 白文娟,焦菊英,张振国.黄土丘陵沟壑区退耕地土壤种子库与地上植被的关系[J].草业学报,2007,16(6):30-38.

[33] 赵丽娅,李元哲,陈红兵,等.科尔沁沙地恢复过程中地上定植群落与土壤种子库特征及其关系研究[J].生态环境学报,2018,27(2):199-208.

[34] Roach D A. Buried seed and standing vegetation in two adjacent tundra habitats, northern Alaska[J]. Oecologia, 1983,60(3):359-364.

[35] Maranon T. Soil seed bank and community dynamics in an annual-dominated Mediterranean salt-marsh [J]. Journal of Vegetation Science, 1998,9(3):371-378.

[36] 刘鹏,田长彦.盐分、温度对猪毛菜种子萌发的影响[J].干旱区研究,2007,24(4):504-509.

[37] 严文斌,全国明,章家恩,等.环境因子对三叶鬼针草与鬼针草种子萌发的影响[J].生态环境学报,2013,22(7):1129-1135.

[38] 骆土寿,邱建丽,李意德,等.森林冠层结构的生态学研究现状与展望[J].广东林业科技,2008,24(1):75-82.

[39] 苏娜,焦菊英,王志杰.陕北黄土丘陵沟壑区坡沟立地环境下幼苗的存活特征[J].植物生态学报,2014,38(7):694-709.

[40] 王宁.黄土丘陵沟壑区植被自然更新的种源限制因素研究[D].北京:中国科学院研究生院,2013.