

子午岭辽东栎天然林土壤种子库研究^{*}

陈莉,程积民,万惠娥,韩天丰

(西北农林科技大学 中国科学院 水利部 水土保持研究所,陕西 杨陵 712100)

摘要:结合野外调查与室内试验对子午岭辽东栎天然林的种群生长状况,枯落层种子库,不同坡位土壤种子库物种组成、数量特征、生活型及其与地上植被的相似性进行了较为系统的研究。结果表明:(1)试验萌发鉴定出的幼苗共有 24 种,隶属于 16 科,其中多年生草本和落叶灌木物种比例最高,分别占种子库物种总数的 58.33 % 和 12.5 %;(2)整个子午岭天然辽东栎林土壤种子库总密度为 12 761.44 粒/m²,种子主要分布在枯枝落叶层和 0 - 2.5 cm 土层中,其中,辽东栎种子密度为 752.5 粒/m²,占整个样地土壤种子库总密度的 5.89 %,表明辽东栎种子萌发能力很差,该林分群落天然更新缓慢。(3)子午岭天然辽东栎林的下坡位物种多样性指数较其它坡位高,但各个样地物种多样性指数均高于对照;(4)天然辽东栎纯林的种群生长状况良好,树龄均为成年树种;(5)方差分析表明:辽东栎的胸径、地径在不同坡位之间均具有显著性差异($P > 0.05$);(6)相关分析表明:枯枝落叶层厚度、重量与土壤种子库密度之间具无显著相关性($P < 0.05$)。

关键词:子午岭;辽东栎林;种子库;物种多样性指数

中图分类号:S714.3

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2009)04-0150-06

A Study on the Soil Seed Bank of a Natural Forest of *Quercus Liaotungensis* in Zi wuling Moutain

CHEN Li, CHENG Ji-ming, WAN Hui-e, HAN Tian-feng

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

Abstract: A systematic study was conducted to examine the growth condition of the population, the seed bank in the litter layer, the composition of soil seed bank in the different position on slope and its quantitative characteristics, vegetative life-form and the similarity with aboveground vegetation. The results showed: (1) The characteristics of soil seed bank in the plots were identified as 24 species through germination test in the lab, which belongs to 16 families. In the species of seed bank, perennial herbs and shrubs occupied dominant positions; and accounted for 58.33 % and 12.5 % respectively; (2) The density of the seed bank was 12 761.44 seeds/m², the seed mainly existed in the litter layer and 0 - 2.5 cm soil horizon and the density of the seed of *Q. Liaotungensis* was 752.5 seeds/m² (5.89 %), which indicated a low germination rate of it and a slow restoration; (3) The diversity index in the down slope was higher than the other positions and they were all higher than the control; (4) The natural forest developed well and it was dominated by adult trees. (5) With an analysis of variance, the diameter at breast height and aboveground were both at significant difference in the different position on slope. (6) With a correlation analysis, the height and weight of the litter layer were at low dependability with the seed bank's density.

Key words: Zi wuling Moutain; forest of *Q. Liaotungensis*; seed bank; diversity index

土壤种子库(soil seed bank)是指存在于土壤上层凋落物和土壤中全部存活种子的总和^[1],与地上植被一样,是植物群落的组成部分,是一个潜在的群落体系^[2]。人类活动越来越多地干扰自然界,在干

^{*} 收稿日期:2009-03-24

基金项目:中国科学院重要方向项目(KZCX2-YW-441);国家重点基础研究发展计划973项目(2007CB106803);国家科技支撑课题(06BAD09B08);自然科学基金重点项目(40730631);国家林业局:全国沙化型地区定位监测

作者简介:陈莉(1972-),女,四川阆中人,在读硕士,主要从事草地生态方面的研究。E-mail:chenli072@163.com

通信作者:程积民(1955-),研究员,博导,从事恢复生态学方面的研究工作。E-mail:gyzcm@ms.iswc.ac.cn

扰恢复的过程中经常起关键作用的种子库在植被管理和重建中常常具有重要作用。研究土壤种子库的组成、动态以及它在植被的恢复和演替中的作用,有助于对农田、森林和自然保护区的管理,可以帮助人类在环境治理方面作出合理的决策^[3-5]。因而,对土壤种子库的研究已成为恢复生态学的重要内容,是生态学中研究热点之一^[6-7]。

我国对种子库的研究始于20世纪80年代后期,对森林土壤种子库的研究近年来也多有报道,但对黄土高原子午岭森林土壤种子库还缺乏系统研究^[8],近年来,对子午岭天然次生林类型土壤种子库研究虽然陆续有所报道^[8-9],但对该地区天然辽东栎林土壤种子库的萌发试验还未涉及,通过对子午岭林区天然辽东栎林调查取样,采用萌发法,从不同海拔梯度对子午岭辽东栎纯林土壤种子库的种类组成、数量特征、物种多样性以及土壤种子库与地上植被的关系进行研究,以期为森林植被更新和可持续经营策略提供科学依据。

1 研究区自然概况

研究区位于黄土高原子午岭北部甘肃省合水县连家砭林场,地理位置为北纬35°03' - 36°37',东经108°10' - 109°08',此地区属黄土高原丘陵沟壑区,海拔高度约为1300~1500 m,相对高差200 m左右。该区25 a年均气温7.4℃,年均降雨量587.6 mm,干燥度0.97,10℃积温2671℃,平均相对湿度63%~68%,为半干旱季风气候区。土壤为原生或次生黄土,厚度约为50~100 m,其下为厚约80~100 m的红土,以石灰性褐土为主^[10-11]。

2 试验设计与方法

2.1 样地设置

试验样地位于甘肃省子午岭辽东栎天然次生林区,2007年10月底在子午岭辽东栎天然林区的不同坡位的典型地段取样。

2.2 试验方法

2.2.1 地上植被调查 2007年10月底在子午岭辽东栎天然林区的不同坡位采用固定样线法按照乔、灌、草的顺序调查。

乔木(辽东栎)生长调查:在不同坡位采用固定样线法设置20 m×20 m的样方3个,同时在该样方内随机选取30株辽东栎树种,并测定每一株的分枝个数、树高(m)、胸径(cm)、地径(cm)、枝下高(m)、冠幅(m)等指标。灌木树种生长调查:在不同坡位采用固定样线法设置4 m×4 m的样方5个,

同时在该样方内调查灌木的树种组成、每一树种的分枝个数、株高(cm)、地径(cm)、冠幅(m)、株数等指标。草本植物种群生长调查:在不同坡位采用固定样线法设置1 m×1 m的样方10个,同时在该样方内调查:植物种类组成、密度(株/m²)等指标。

2.2.2 土壤种子库取样

(1) 土壤种子库的取样时间。取样时间安排在2007年10月末11月初,以便保证种子完全成熟又未萌发的季节,这样土壤中既有短期种子库又有长期种子库。

(2) 取样方法。取样地点在黄土高原子午岭北部甘肃省合水县连家砭林场,按海拔高度的不同在天然辽东栎林的上、中、下3个坡位分别设立规格为20 m×20 m的大样方一个,依次编号为1,2,3,然后在大样方内随机布置20 cm×20 cm的小样方15个,土样分5层进行采集,分别为:枯枝落叶层,0~2.5 cm,2.5~5 cm,5~7.5 cm,7.5~10 cm。然后将每3个小样方的相同土层土壤混合后组成的混合土样作为1个样本,每个坡位得到5个样本,共计15个样本,每个样本按5个土层深度分别收集,共获得75份土样。土样装入做好标记的塑料袋内保存。另外在样地附近选择一处荒山进行对照取样,取样方法同天然辽东栎林土壤取样,只是仅取3个样本,且因荒山无枯枝落叶层,故仅作4层进行收集,共取得土样12份。合计共获土样87份。

(3) 土壤种子库的萌发试验。在培养皿(长27.5 cm,宽24.5 cm,高4 cm)中先装上2 cm厚的无种子细砂(置于恒温150℃的鼓风干燥箱内烘4 h)。再在细砂上面均匀地铺上土壤样品,再用3个培养皿装满无种子细砂作为对照来监测是否有由空中传播的种子污染萌发装置。所有的萌发装置均摆放在自然光条件下的玻璃室内(温度12~25℃),按照土壤的需水量适当浇水,以保持土壤湿润。每天观测一次种子萌发状况,对已萌发的幼苗进行种类鉴定,计数后清除,暂时不能鉴定的幼苗进行标记后移栽至盆外,直至幼苗长到能鉴定为止。整个过程持续至盆中不再有幼苗长出,然后将土样搅拌均匀,继续观测,直至土样中半个月时间不再有种子萌发,结束萌发实验。本次实验从2008年3月8日开始,至7月6日结束,共持续观察时间为121 d。

2.2.3 数据处理

(1) 土壤种子库的密度。种子密度:(种子数/m²)=出苗数/盆×(盆样品重/总样品重)/取样面积,即为样地土壤种子库的种子密度^[12]。

(2) 土壤种子库物种多样性。根据各群落中物

种数及其种子数量,分别采用 Margalef 丰富度指数、Shannon - Wiener 多样性指数公式计算物种丰富度和物种多样性指数。均匀性指数采用 Pielou 系数公式计算种子库物种的均匀性系数^[13]。计算公式为

Margalef 丰富度指数: $R = \frac{(S - 1)}{\ln(N)}$

Shannon - Wiener 多样性指数: $H = - \sum_{i=1}^S (P_i \ln P_i)$

Pielou 均匀性系数: $E = \frac{H}{\ln(S)}$

式中: S ——物种数, N ——所有种的个体总数; P_i ——第 i 种植物的个体数占总所有物种个体总数的比例; H ——Shannon - Wiener 多样性指数。

(3) 土壤种子库与地上植被的相似性用 Sorensen 指数^[14]

$C_c = 2C / (S_1 + S_2)$

式中: C_c ——Sorensen 指数; C ——在植被与土壤种子库中都出现的物种数目; S_1, S_2 ——对应于植被和土壤种子库出现的物种数目。

2.2.4 统计分析 应用 SPSS16.0 统计软件对不同分层土壤种子库密度数据及地上植被调查数据进

行显著性检验等统计分析。

3 结果与分析

3.1 天然辽东栎林土壤种子库物种组成及生活型特征

由表 1 可知:试验萌发鉴定出的幼苗共有 24 种,隶属于 16 科,其中乔木仅有 2 科 2 种,占总种数的 8.33%,灌木有 3 科 4 种,占总种数的 16.7%,(常绿灌木 1 种,落叶灌木 3 种),草本植物有 12 科 18 种,占总种数 75%,(多年生草本 14 种,占 58.33%,一年生草本 3 种,占 12.5%,一年或两年生草本 1 种,占 4.17%,其中禾本科(Gramineae)、蔷薇科(Rosaceae)、唇形科(Labiatae)均为 3 种,各占总种数的 12.5%,菊科(Compositae)、莎草科(Cyperaceae)均为 2 种,各占总种数的 8.33%,壳斗科(Quercus rubra L)、槭树科(Acer rubrum)、胡颓子科(Elaeagnaceae)、豆科(Leguminosae)、堇菜科(Violaceae)、玄参科(Scrophulariaceae)、藜科(Chenopodiaceae)、蓼科(Polygonaceae)、茜草科(Rubiaceae)、旋花科(Convolvulaceae)、天南星科 Araceae 分别仅占一种,各占 4.17%。

表 1 天然辽东栎林土壤种子库物种组成及生活型特征

植物类型	科名	种名	拉丁名	生活型
乔木层	壳斗科	辽东栎	<i>Querculo tungensis</i>	落叶乔木
	槭树科	槭树	<i>Acer rubrum</i>	落叶乔木
灌木层	胡颓子科	胡颓子	<i>Elaeagnus pungens</i> Thunb	常绿灌木
	豆科	二色胡枝子	<i>Lespedeza bicolor</i> Turcz.	落叶灌木
	蔷薇科	黄刺玫	<i>Rosa xanthina</i> Lindl.	落叶灌木
		绣线菊	<i>Lagopsis supina</i> (Steph. ex Willd.) Ik - Cal. ex knorr	落叶灌木
草本层	莎草科	白颖薹草	<i>Carex rigescens</i> (Franch) V. krecz	多年生草本
		大披针薹草	<i>Carex lanceolata</i> Boott	多年生草本
		夏至草	<i>Lagopsis supina</i> (Steph. ex Willd.) Ik - Cal. ex knorr	多年生草本
	唇形科	野薄荷	<i>Mentha haplocalyx</i> (Briq.) kudo	一年生草本
		益母草	<i>Leonurus heterophyllus</i> sweet	一年或两年生
		野菊花	<i>Dendranthema indicum</i> (L.) Des Moul	多年生草本
	菊科	山苦荬	<i>Ixeris Chinese</i> (Thunb) . Nakai	多年生草本
		硬质早熟禾	<i>Poa sphondylodes</i> Trin.	多年生草本
	禾本科	香芒草	<i>Cymbopogon distans</i> (Nees) Wats	多年生草本
		菵草	<i>Arthraxon hispidus</i> (Thunb.) Makino	一年生草本
	堇菜科	紫花地丁	<i>Viola philippica</i> Cav.	多年生草本
	蔷薇科	多裂菱陵菜	<i>P. multifida</i>	多年生草本
	玄参科	地黄	<i>Rehmannia glutinosa</i> Libosch.	多年生草本
	藜科	藜	<i>Chenopodium album</i> L.	一年生草本
	蓼科	珠芽蓼	<i>Polygonum viviparum</i> Linn.	多年生草本
	茜草科	茜草	<i>Rubia cordifolia</i> L.	多年生草本
	旋花科	田旋花	<i>Convolvulus arvensisi</i> L	多年生草本
	天南星科	贝母	<i>Typhonium giganteum</i> Engl	多年生草本

表 2 各样地种子库密度及分层种子所占比例

样地	种子库总密度/ (粒·m ⁻²)	辽东栎种子密度/ (粒·m ⁻²)	各层种子所占比例/ %				
			A	B	C	D	E
1	4167.32	175.00	67.40	86.01	61.93	45.09	37.48
2	3145.15	192.50	88.22	111.9	80.57	58.65	48.76
3	5448.97	385.00	53.77	68.04	48.99	35.66	29.65
4	12761.44	752.50	25.93	27.63	19.89	14.48	12.04

注:1:上坡;2:中坡;3:下坡;4:整个样地;A:枯枝落叶层,B:0-2.5 cm;C:2.5-5 cm;D:5-7.5 cm,E:7.5-10 cm。

3.2 天然辽东栎林土壤种子库密度及垂直分布格局分析

由表 2 可以看出,子午岭天然辽东栎林整个样地土壤种子库为 12 761.44 粒/m²,其中,下坡>上坡>中坡;而辽东栎种子数大小顺序为:上坡<中坡<下坡,这可能是由于辽东栎种子本身的物理特性所决定的,辽东栎种子椭圆形,比杏核稍小,表面光滑,所以在外力的作用下(例如,风力)随着海拔高度降低,会由坡上滚落至坡下,这可能是造成坡下种子居多的主要原因。同时,又分析了 A-E 层种子所占比例。由表 3 可知,在整个样地当中,A-E 层种子所占比例大小依次为:B>A>C>D>E,即 0-2.5 cm 土层所含种子最多,枯枝落叶层次之。这个规律符合土壤种子库的概念:“主要存在于土壤上层凋落物和土壤中全部存活种子的总和”^[15]。同时,在各个样地上,各层土壤中所占比例也完全符合这个规律。

表 3 不同样地土壤种子库物种丰富度、多样性和均匀性指数

坡位	Margalef	Shannon - Wiener	Pielou
	R	H	E
上坡	5.286	1.927	0.591
中坡	3.446	1.792	0.632
下坡	3.339	2.015	0.711
对照	2.055	1.528	0.664

3.3 天然辽东栎林土壤种子库物种多样性分析

由表 3 可以看出,在子午岭天然辽东栎林的不同坡位上,物种多样性指数具有明显变化。丰富度指数(R):上坡>中坡>下坡;物种多样性指数(H):下坡>上坡>中坡;物种均匀度指数(E):上坡<中坡<下坡。同时,我们可以清楚的看出,子午岭天然辽东栎林土壤种子库的物种丰富度指数,物种多样性指数均大于荒山对照,而其物种均匀度指数只有下坡位大于荒山对照,而上坡和中坡的均匀度指数小于荒山对照,从以上的各个物种多样性指数的比较中,我们可以看出在子午岭辽东栎林中,随海拔高度降低植物种类依次减少,但物种多样性只有下坡最好,而且各个植物种分布也比较均匀。这

充分说明,环境因子对物种分布,种类组成有密切关系,即在下坡位雨量充沛,温度适宜,阳光充足,所以植被群落结构稳定。

3.4 天然辽东栎林土壤种子库与地上植被的相似性分析

天然辽东栎林土壤种子库与地上植被的相似性系数为 0.164,相似性程度不高,说明土壤种子库与地上植被共有物种较少。统计结果表明,地上植被的种类为 32 种,土壤种子库中有 24 种植物,地上植被与土壤种子库的共有物种是 8 种(辽东栎、胡颓子、二色胡枝子、绣线菊、黄刺玫、地丁、大披针苔草、茜草),在地上植被存在而并没有在种子库内找到的植物有 24 种,在种子库内存在而地上植被不存在的植物有 16 种,但是,共有物种数占地上植被物种数的 25%,共有物种数占土壤种子库物种数的 33.3%(>25%),这说明地上植被对土壤种子库的贡献较大。由于不同物种种子萌发所需的适宜条件不相同,很难在一个试验中满足所有物种种子萌发的最适条件,导致种子库中有一些物种不能萌发,从而低估了种子库的物种组成,也造成地上植被与种子库物种组成差异较大。

3.5 天然辽东栎林建群种生长分析

由表 4 可知,通过对子午岭天然辽东栎林建群种辽东栎各个生长指标的方差分析表明,在子午岭的不同坡位上,辽东栎的分枝数,冠幅,树高,枝下高均无显著性差异($P>0.05$),而其胸径,地径在子午岭的上坡,中坡,下坡之间均有显著性差异($P<0.05$)。这可能是由于辽东栎本身所具有的特性引起的,同时也说明辽东栎的分枝数,冠幅,树高,枝下高等指标的生长状况受海拔环境因子影响较小,而辽东栎林的胸径,地径的生长优劣与海拔高度环境因子有密切关系。同时,根据 Adult 的高度划分法^[15]:树高(H)小于 50 cm 记为幼苗(Seedling, H<50 cm),树高大于 50 cm 但小于 2 m 记为幼树(Sapling, 200 cm<H<50 cm),大于 2 m 记为成树(Adult, H>200 cm),通过表 1 可知,辽东栎林的平均树高为(9.32±1.99)m>2 m,即子午岭辽东栎天然林全部为成树。

表 4 子午岭不同坡位天然辽东栎林建群种辽东栎生长状况分析(均值 ±标准差)

测量指标	上坡	中坡	下坡	合计
分枝数/个	2.57 ±1.41	2.40 ±1.16	2.17 ±1.09	2.38 ±1.22
冠幅/ m ²	4.10 ±3.66	4.24 ±4.05	2.63 ±2.36	3.66 ±3.47
树高/ m	9.77 ±1.87	8.83 ±2.00	9.36 ±2.07	9.32 ±1.99
枝下高/ m	4.98 ±1.48	4.93 ±1.73	4.91 ±1.46	4.94 ±1.55
胸径/ cm	67.77a ±28.73	44.03b ±18.57	60.77ac ±22.07	57.52 ±25.31
地径/ cm	82.03a ±33.93	51.87b ±19.37	79.77ac ±30.25	71.22 ±31.40

注:数据后标相同字母表示差异不显著($P>0.05$),标不同字母者表示差异显著($P<0.05$)。

由表 5 可知,通过对整个子午岭天然辽东栎林的枯落层厚度、重量,枯落层中所包含的种子数量进行相关分析表明:在整个辽东栎林中,枯落层的厚度与枯落层的重量之间具有极显著性差异($P<0.01$),枯落层的厚度与枯落层中的种子数之间没有显著性差异($P>0.05$),而枯落层的重量与枯落层中的种子数之间具有显著性差异($P<0.05$)。

表 5 子午岭不同坡位辽东栎林枯落层厚度、重量及其辽东栎种子数的相关性分析

	厚度	重量	种子数
厚度	1	0.745 **	0.196
重量	0.745 **	1	0.407 *
种子数	0.196	0.407 *	1

注: * 表示显著性水平为 0.05; ** 表示显著性水平为 0.01; $N=30$ 个样方。

4 讨论与结论

(1) 萌发试验统计到天然辽东栎林土壤种子库中共有 24 个物种,分属于 16 科,其中菊科、禾本科、唇形科、莎草科、蔷薇科植物较多,落叶灌木和多年生草本植物在物种数和种子数方面均占据明显优势。胡颓子、二色胡枝子、绣线菊、夏至草、白颖苔草、野薄荷、多裂萎陵菜等物种的种子数量最多。

(2) 子午岭天然辽东栎林土壤种子库总密度为 12 761.44 粒/ m²,下坡土壤种子库所含种子最多(5 448.97)粒/ m²,上坡次之(4 167.32)粒/ m²,中坡最少(3 145.149)粒/ m²。各层土壤种子库密度的规律为:B>A>C>D>E。即土壤种子库中种子主要集中在 0-2.5 cm 和枯枝落叶层中。另外,土壤种子库中辽东栎种子密度相对较低,这说明,虽然整个样地土壤种子库密度很高,但土壤种子库质量不高,这可能也正是天然辽东栎林天然更新较缓慢的一个主要原因。

(3) 天然辽东栎林土壤种子库物种多样性分析表明:Margalef 丰富度指数,上坡(5.286)>中坡(3.446)>下坡(3.339);物种多样性指数(H'):下坡

(2.015)>上坡(1.927)>中坡(1.792);物种均匀度指数(E'):上坡(0.591)<中坡(0.632)<下坡(0.711)。即说明在上坡物种最为丰富,物种多样性较低,均匀性最差,下坡物种最少,但多样性和均匀性最好。这一结论反映了该天然辽东栎林物种组成与环境因子的密切关系。即群落结构的优劣不仅受到群落自身的影响,而且与周围的水分、热量、温度、海拔等环境因子有密切的关系。

(4) 土壤种子库的种类组成与地上植被相似性小的原因是多方面的。首先,和种子的命运有关。土壤种子库中的种子由于病虫害危害,动物采食、搬运到其它处,自然衰老、休眠等因素,只有部分萌发;地上植被的种子保留在母株上没有进入土壤种子库;地上植被的种子虽然进入到土壤种子库,但属于短暂留存种子,在调查前落在地表后迅速萌发或死亡。有的研究还发现演替影响土壤种子库与地上植被的关系,如在森林的演替初期,土壤种子库与地上植被共有的种子种类储量较多,土壤种子库组成与地上植被组成间的相似性大,随着林龄的增大,外来种子的比例逐渐增加^[18],演替后期土壤种子库组成与地上植被组成间的相似性较低^[17]。本研究的结论为:地上植被与土壤种子库相似性系数为 0.164,即很低。这一结论证明了赵萌莉和许志信提出的演替后期植被与土壤种子库组成间的相似性较低这一结论^[17]。

(5) 子午岭天然林的建群种为辽东栎,且绝大部分辽东栎的树龄为成年树。另外,辽东栎的分枝数为(2.38 ±1.22)个,冠幅为(3.66 ±3.47) m²,树高为(9.32 ±1.99) m,枝下高为(4.94 ±1.55) m,它们均无显著性差异($P>0.05$)。只有胸径(57.52 ±25.31) cm 和地径(71.22 ±31.40) cm 两个生长指标在不同坡位之间具有显著性差异($P<0.05$)。这一结果说明子午岭天然辽东栎林生长状况良好,经过多年的次生演替和人为保护,现已得到了明显修复。这一结论与王辉和任继周^[16]的研究结论一致。

(6) 天然辽东栎林土壤种子库中的辽东栎种子数与地上枯落层的厚度、重量有密切关系。方差分

析表明:枯落层厚度、重量对土壤种子库密度有显著影响,但对其影响机理问题还有待进一步深入研究。

参考文献:

[1] 赵凌平,程积民,万惠娥.土壤种子库研究进展[J].中国水土保持科学,2008,6(5):112-118.

[2] Bakker J P. Nature Management by Grazing and Cutting [M]. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1989.

[3] 张玲,李广贺,张旭,等.土壤种子库研究综述[J].生态学杂志,2004,23(2):114-120.

[4] 杨跃军,孙向阳,王保平,等.森林土壤种子库与天然更新[J].应用生态学报,2001,12(2):304-308.

[5] 于顺利,蒋高明.土壤种子库的研究进展及若干研究热点[J].植物生态学报,2003,27(4):552-560.

[6] 孙书存,陈灵芝.东灵山地区辽东栎种子库统计[J].植物生态学报,2000,24(2):215-221.

[7] Chippindale W E, Milton W E. On the viable seeds present in the soil beneath pastures[J].J. Ecol.,1934,22:508-531.

[8] 王辉,任继周.子午岭主要森林类型土壤种子库研究[J].干旱区资源与环境,2004,18(3):130-135.

[9] 陈智平,王辉,袁宏波.子午岭辽东栎林土壤种子库及种

子命运研究[J].甘肃农业大学学报,2005,40(1):7-12.

[10] 邹厚远,刘国彬,王晗生.子午岭林区北部近50年植被的变化发展[J].西北植物学报,2002,22(1):1-8.

[11] 李师翁,刘立品.子午岭森林与灌丛植被的主要类型及特征的研究[J].西北植物学报,2004,24(2):275-280.

[12] 孙建华,王彦荣,曾严军.封育和放牧条件下退化荒漠草地土壤种子库特征[J].西北植物学报,2005,25(10):2035-2042.

[13] 马克平.生物群落多样性的测度方法 I:a 多样性的测度方法(上)[J].生物多样性,1994,2(3):162-168.

[14] 赵凌平,程积民,万惠娥,等.黄土高原草地封育与放牧条件下土壤种子库特征[J].草业科学,2008,25(10):78-82.

[15] Simpson R L. Ecology of soil seed bank[M]. San Diego:Academic Press,1989:313-317.

[16] 王辉,任继周.子午岭主要森林类型土壤种子库研究[J].干旱区资源与环境,2004,18(3):130-136

[17] 赵萌莉,许智信.内蒙古乌兰察布西部温性荒漠草地土壤种子库初探[J].中国草地,2000,22(2):46-48.

[18] 唐勇,曹敏,张建候,等.西双版纳热带森林土壤种子库与地上植被的关系[J].应用生态学报,1999,10(3):279-282.

(上接第 149 页)

[17] 刘建立,徐绍辉.根据颗粒大小分布估计土壤水分特征曲线:分形模型的应用[J].土壤学报,2003,40(1):46-52.

[18] 黄冠华,詹卫华.土壤水分特性曲线的分形模拟[J].水科学进展,2002,13(1):55-60.

[19] 徐永福,董平.非饱和土的水分特征曲线的分形模型[J].岩土力学,2002,23(4):400-405.

[20] 程先富,史学正,王洪杰.红壤丘陵区耕层土壤颗粒的分形特征[J].地理科学,2003,23(5):617-621.

[21] 邓良基,林正雨,高雪松,等.成都平原土壤颗粒分形特征及应用[J].土壤通报,2008,39(1):38-42.

[22] 庄淑莹.耕层土壤颗粒表面的分形特征研究[J].土壤通报,2007,38(3):439-442.

[23] 程先富,赵明松,史学正,等.兴国县红壤颗粒分形及其与环境因子的关系[J].农业工程学报,2007,23(12):76-79.

[24] 安徽省土壤普查办公室.安徽土种[M].北京:科学出版社,1994.

[25] 安徽省土壤普查办公室,安徽土壤[M].北京:科学

出版社,1994.

[26] 朱晓华,杨秀春,蔡运龙.中国土壤空间分布的分形与分维[J].土壤学报,2005,42(6):881-888.

[27] Aray L M, Paris J F. A physicoempirical model to predict the soil moisture characteristic from particle-size distribution and bulk density data [J]. Soil Sci. Soc. Am. J.,1981,45:1023-1030.

[28] Tyler S W, Wheatcraft S W. Application of fractal mathematics to soil water retention estimation [J]. Soil Sci. Soc. Am. J.,1989,53:987-996.

[29] Turcotte D L. Fractal and fragmentation [J]. Journal of Geophysical Research,1986,91(12):1921-1926.

[30] Kravchenko A, Zhang R. Estimating the soil water retention from particle-size distribution:a fractal approach[J]. Soil Sci. Soc. Am. J.,1998,63(3):171-179.

[31] 杨培岭,罗远培,石元春.用粒径的重量分布表征的土壤分形特征[J].科学通报,1993,38(20):1896-1899.