

毛乌素沙地克隆植物生长对 AM 真菌多样性和菌根形成的影响

赵金莉, 贺学礼*

(河北大学生命科学学院, 河北 保定 071002)

摘要: 克隆植物的生态功能在沙地植被恢复过程中占据着重要位置。在毛乌素沙地由北向南选择两个典型样地, 以根茎克隆植物沙鞭和羊柴为试验材料, 连续 2a 系统地研究了克隆植物生长对 AM 真菌物种多样性和菌根形成的影响。结果表明: 克隆植物生长对 AM 真菌物种多样性和丛枝菌根形成的影响因植物种类和样地不同而异。沙鞭通过克隆生长侵入灌丛空地后, AM 真菌多样性指数在中国科学院植物研究所鄂尔多斯沙地草地生态研究站 (简称 OSES) 和陕西榆林珍稀沙生植物保护基地 (简称 RSCF) 样地均上升; 孢子密度、菌丝、丛枝和总定殖率均显著提高; 泡囊定殖率也有所增加, 在 OSES 样地达显著水平, 在 RSCF 样地未达显著水平。羊柴通过克隆生长侵入灌丛空地后, AM (*Arbuscular mycorrhizal*) 真菌多样性指数在 OSES 样地上升, 而在 RSCF 样地下降; 孢子密度和丛枝定殖率在 OSES 和 RSCF 样地均显著增加, 而泡囊定殖率均显著降低; 菌丝和总定殖率也降低, 在 OSES 样地未达显著水平, 在 RSCF 样地达显著水平。

关键词: 克隆植物; 生长入侵; AM 真菌; 物种多样性; 菌根形成; 毛乌素沙地

Effects of the growth of clonal plants on the diversity of AM fungi and mycorrhizal formation in Mu Us sandland

ZHAO Jinli, HE Xueli*

College of Life Sciences, Hebei University, Baoding 071002, China

Abstract: The research investigated the effects of the growth of clonal plants on the diversity of AM fungi and mycorrhizal formation over two years at two representative sites, OSES and RSCF, from north to south, in Mu Us sandland. The clonal plants were *Psammochloa villosa* and *Hedysarum leave*. The results showed that the ability of clonal plants to increase the diversity of AM fungi and mycorrhizal formation differ between plant species and sampling sites. After *P. villosa* invasion, the Shannon-Weiner index of AM fungi rose in both sampling sites. Additionally, the spore density level, the colonization rate of hyphae and arbuscules, the total colonization rate and colonization rate of vesicles all significantly increased. After *H. leave* invasion, the Shannon-Weiner index of AM fungi rose in OSES but descended in RSCF. At both sites, the spore density and colonization rate of arbuscules significantly increased and, at each, the colonization rate of vesicles rose to a maximum then declined. At OSES the hyphae and total colonization rate rose to a maximum and remained but at RSCF these values declined significantly after peaking.

Key Words: clonal plant; clonal growth; AM fungi; species diversity; mycorrhizal formation; Mu Us sandland

毛乌素沙地是我国西北地区土地荒漠化发展比较典型的地区之一, 局部地区植被退化较为严重, 且正处于荒漠化日趋加剧状态, 植被退化也正处于大的变更当中^[1]。克隆植物普遍存在于各个分类群和几乎所有的生态系统中, 并且在很多生态系统中处于优势或建群地位, 发挥着重要功能^[2-3]。沙地植被恢复过程中存

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (40471637)

收稿日期: 2009-01-05; **修订日期:** 2009-05-18

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: xuelh1256@yahoo.com.cn

在着明显的物种更替、群落环境变化等次生演替现象,在群落环境变化和物种更替过程中,克隆植物的生态功能占据着重要位置。丛枝菌根真菌在自然界中广泛分布,是自然生态系统中重要的组成部分,它对生态系统的演替过程、物种多样性和生产力及被破坏生态系统的恢复与重建等都有十分重要的作用^[4-6],合理稳定的 AMF 种类组成是健康的生态系统中不可缺少的部分。

恢复生态学理论认为,脆弱或退化生态系统的恢复与重建,必须从整体上进行全方位考虑,在恢复地上部分植物的同时,也要对地下部分与植物共生的功能微生物进行恢复。因此,当用土著植物或引入植物对退化生态系统进行植被恢复时,土壤中是否存在与之相应的 AM 真菌就显得尤为重要。本研究选取毛乌素沙地两种重要的游击型克隆植物-沙鞭和羊柴为目标植物,较为系统地研究了它们的克隆生长入侵对土壤性质和丛枝菌根多样性及菌根形成的影响,旨为应用菌根技术使克隆植物在荒漠植被恢复和生态重建中发挥重要作用提供依据。

1 材料和方法

1.1 研究物种

沙鞭(*Psammochloa villosa*)是禾本科沙鞭属根茎多年生大型草本植物,分布在我国西北诸省区,是典型的旱生、沙生植物,对流动沙丘有很强的适应性,为沙地植物群聚的优势种^[7-8],是毛乌素沙地沙丘植被演替少数几个先锋种之一^[9-10]。

羊柴(*Hedysarum laeve*),学名塔洛岩黄芪,是豆科岩黄芪属的多年生半灌木。在我国北方,主要分布在草原和沙地的半固定沙丘和固定沙丘上^[11],是一种沙生中旱生植物,其根状茎能够在沙层中形成复杂的网络结构^[12],具有较强的固沙作用^[13]。

1.2 研究样地

在毛乌素沙地从北向南选择两个代表性样地,即中国科学院植物研究所鄂尔多斯沙地草地生态研究站(OSES)和陕西榆林珍稀沙生植物保护基地(RSCF)。OSES(39°29'N;110°11'E)位于内蒙古鄂尔多斯高原毛乌素沙地的东北缘,海拔高度 1300—1400 m,年平均温度 6.0—8.5℃,年平均降雨量 370 mm。RSCF(38°21'N; 109°40'E)位于毛乌素沙地的南缘,海拔高度 1200 m,年平均温度 10.7℃,年平均降雨量 412.4 mm。

1.3 样方的选择标记

2005 年 7 月中旬在中国科学院植物研究所鄂尔多斯沙地草地生态研究站和陕西榆林珍稀沙生植物保护基地克隆植物沙鞭和羊柴群落样地中分别随机选择 4 块灌丛空地作为固定样方,共计 16 个样方。固定样方选在克隆植物根状茎延伸的方向上,样方大小为 1m × 1m,在选定样方的 4 个角上分别插上一个红色的木桩作为标记。

1.4 样品采集

2005 年 7 月中旬和 10 月中旬及 2006 年 5 月中旬、7 月中旬和 10 月中旬在每个固定样方的中央分 0—10、10—20、20—30、30—40、40—50cm 5 个土层各采样 1 次,每个样品采集约 1kg 左右根土混合样,分别装入密封塑料袋内,共计 480 份样品,同时详细记录样方内再生植物种类和个体数。

1.5 样品的测定

每次采集的样品带回实验室后,把两样地不同克隆植物灌丛空地的样品按入侵(标记为入侵后)和不入侵(标记为入侵前)进行分组。风干后过 2 mm 细筛分离根样和土样。土样用于测定土壤理化性质和分离 AM 真菌孢子,AM 真菌种类鉴定根据 Schenck and Pérez 的“VA 菌根真菌鉴定手册”及 INVAM(<http://invam.caf.wvu.edu/Myc-Info/>)的分类描述^[14],并参阅有关鉴定材料和近年来发表的新种等进行种属鉴定;统计 AM 真菌多样性的变化;根样用于观察菌根共生体结构特征和侵染率的测定。

土壤 pH 值:数字式酸度计测定(土壤:水 = 1:5);碱解氮:碱解扩散法;有效磷:按 Olsen 等^[15]用 NaHCO₃ 浸提后采用 Murphy 和 Riley^[16]法测定;速效钾:原子吸收光谱法;有机质:按 Walkey-Black^[17]法测定。

采用湿筛倾析-蔗糖离心法^[18]从土壤样品中分离孢子,计算不同样方植物根际孢子密度(spore density,

$SD)^{[19]}$;AM 真菌丰度(species richness, SR)。

根段样品用蒸馏水冲洗 2—3 次,并切成 1 cm 左右长度的根段,于 10% 的 KOH 溶液中 90℃ 下脱色透明,至根段变软,再用蒸馏水冲洗干净;用 0.05% 酸性品红乳酸甘油溶液染色 2—4h,再用乳酸分色、制片^[20]。在 Nikon YS100 显微镜下观察菌根结构(丛枝、泡囊及菌丝)。每个样品在显微镜下观察 50 个根段,按 Abbott, Robson 和 Boer 的方法统计菌根侵染率^[21]。

1.6 数据分析

实验数据利用统计分析软件 SPSS 13.0 版本进行统计分析。

2 结果与分析

2.1 克隆植物入侵灌丛空地状况

由表 1 可以看出,沙鞭通过克隆生长产生分株的能力较强,在相同生长时间内沙鞭空地中产生的分株数多于羊柴空地,并且沙鞭在 OSES 的克隆生长状况好于 RSCF。从 2005 年 7 月标记样地至 2005 年 10 月,沙鞭通过克隆生长入侵沙鞭空地数占 50%,而羊柴入侵空地数仅占 25%;2006 年 5 月,沙鞭入侵空地数占 87.5%,而羊柴入侵空地数占 75%;2006 年 7 月,沙鞭空地和羊柴空地全部被入侵。

表 1 克隆植物侵入状况调查表

Table 1 The questionnaire of invasion of clonal plants

样地 Sample sites		不同时间样地内克隆植物子株数 Number of ramets of clonal plants in sample sites in different time				
		2005-07	2005-10	2006-05	2006-07	2006-10
OSES	沙鞭空地 1 <i>P. villosa</i> space No. 1	0	1	2	4	7
	沙鞭空地 2 <i>P. villosa</i> space No. 2	0	3	5	6	9
	沙鞭空地 3 <i>P. villosa</i> space No. 3	0	0	1	3	4
	沙鞭空地 4 <i>P. villosa</i> space No. 4	0	0	2	5	6
	羊柴空地 1 <i>H. leave</i> space No. 1	0	0	1	3	3
	羊柴空地 2 <i>H. leave</i> space No. 2	0	1	1	2	3
	羊柴空地 3 <i>H. leave</i> space No. 3	0	0	0	1	2
	羊柴空地 4 <i>H. leave</i> space No. 4	0	0	1	2	2
RSCF	沙鞭空地 1 <i>P. villosa</i> space No. 1	0	0	0	2	5
	沙鞭空地 2 <i>P. villosa</i> space No. 2	0	1	1	3	6
	沙鞭空地 3 <i>P. villosa</i> space No. 3	0	0	1	2	2
	沙鞭空地 4 <i>P. villosa</i> space No. 4	0	1	2	4	7
	羊柴空地 1 <i>H. leave</i> space No. 1	0	0	2	2	3
	羊柴空地 2 <i>H. leave</i> space No. 2	0	1	1	3	4
	羊柴空地 3 <i>H. leave</i> space No. 3	0	0	0	2	3
	羊柴空地 4 <i>H. leave</i> space No. 4	0	0	1	2	2

2.2 克隆植物入侵对土壤理化性质的影响

由表 2 可见,克隆植物通过克隆生长侵入灌丛空地后对土壤理化性质产生了显著影响,极大地改善了土壤营养状况,其中对土壤速效 N 的影响最为显著。在 OSES 沙鞭克隆生长侵入空地后,土壤速效 N 含量提高了 11.3 倍,有机质含量提高了 8.8 倍,速效 P 提高了 1.7 倍,但是速效 K 含量略有下降,土壤营养状况的改善最为明显。其它样地土壤速效 N、速效 P 和有机质含量均有不同程度的提高。但克隆植物侵入空地后,所有样地土壤 pH 均升高,这可能与植物本身的生理特性有关。

2.3 克隆植物生长对丛枝菌根形成的影响

OSES 沙鞭空地处于流动沙丘上,整个沙丘仅有少量沙鞭定殖,没有其它植物种类生存,故沙鞭侵入灌丛空地前在样地内没有采集到植物根段,从土壤样品中分离到了少量的 AM 真菌孢子。

表 2 克隆植物入侵对土壤理化性质的影响

Table 2 Effects of clonal plants invasion on soil factors

样地 Sample sites	时间 Time	速效 N	速效 P	速效 K	有机质	pH
		Available N /(mg/kg)	Available P /(mg/kg)	Available K /(mg/kg)	Oragnic matter /(mg/kg)	
OSES 沙鞭空地 <i>P. villosa</i> space	入侵前	1.05a	2.23a	23.49a	0.30a	7.23a
	入侵后	12.88b	3.79a	21.62a	2.93b	8.01a
	入侵前	1.59a	2.53a	29.04a	0.98a	7.59a
	入侵后	5.35b	2.98a	36.88a	1.39a	8.18a
RSCF 沙鞭空地 <i>P. villosa</i> space	入侵前	1.68a	4.52a	50.27a	1.43a	7.74a
	入侵后	9.89b	5.15a	33.53b	1.54a	8.12a
	入侵前	2.14a	2.49a	57.10a	2.22a	7.89a
	入侵后	13.63b	5.18b	36.82b	2.70a	8.28a

同一列数据中字母不同者表示在 5% 水平上差异显著,下同

克隆植物生长对丛枝菌根形成的影响因植物种类和样地不同而有所不同(表 3)。沙鞭通过克隆生长侵入灌丛空地后,在 OSES 样地,AM 真菌孢子密度和丛枝菌根不同结构定殖率均显著增加;在 RSCF 样地,AM 真菌孢子密度、菌丝、丛枝和总定殖率均显著提高,泡囊定殖率也有所增加,但未达显著水平。羊柴通过克隆生长侵入灌丛空地后,在 OSES 样地,AM 真菌孢子密度和丛枝定殖率显著增加,而泡囊定殖率显著降低,菌丝和总定殖率也有所下降,但未达显著水平;在 RSCF 样地,AM 真菌孢子密度和丛枝定殖率显著增加,而菌丝、泡囊和总定殖率均显著降低。

表 3 克隆植物生长对菌根形成的影响

Table 3 Effects of clonal plants inbreaking on mycorrhiza

样地 Sample sites	时间 Time	孢子密度	菌丝	泡囊	丛枝	总定殖率
		Spore density /(个/100g 土)	Hyphe /%	Vesicular /%	Arbuscular /%	Total /%
OSES 沙鞭空地 <i>P. villosa</i> space	入侵前	7.25a	0a	0a	0a	0a
	入侵后	31.25b	22.28b	9.03b	1.23b	22.28b
	入侵前	277.25a	55.93a	48.39a	1.56a	58.74a
	入侵后	628.25b	54.44a	27.25b	3.21b	55.93a
RSCF 沙鞭空地 <i>P. villosa</i> space	入侵前	207.80a	29.72a	7.48a	1.07a	30.24a
	入侵后	376.75b	49.61b	8.36a	2.89b	51.16b
	入侵前	479.00a	48.03a	10.62a	2.01a	52.46a
	入侵后	740.50b	35.00b	5.33b	3.52b	37.33b

2.4 克隆植物生长对 AM 真菌多样性的影响

本研究采用的是香农-威纳指数 Shannon-Weiner Index($H = - \sum Pi \cdot \log Pi$), Pi 为某地区土壤内种 i 的孢子级数 Ni 与该地区土壤内 AM 真菌孢子总级数 N 之比,即 $Pi = Ni/N$ 。得出各个样点地区的物种多样性指数。克隆植物生长对 AM 真菌物种多样性产生一定的影响,无论克隆植物入侵前后,球囊霉属的频度仍是最高(表 4,表 5)。沙鞭克隆生长入侵灌丛空地后,样方土壤中 AM 真菌种类更为丰富,在 OSES AM 真菌多样性指数由 0.2690 上升为 0.5566,在 RSCF AM 真菌多样性指数由 0.7227 上升为 0.9368;羊柴克隆生长对 AM 真菌多样性的影响在两样地表现不同,在 OSES 羊柴克隆生长入侵增加了 AM 真菌多样性,多样性指数由 0.8377 上升为 1.0308,在 RSCF 羊柴克隆生长入侵降低了 AM 真菌多样性,多样性指数由 1.0338 下降为 0.9587。在两样地中 AM 真菌群落组成均随着克隆植物生长入侵发生变化(表 5)。

表 4 各样地 AM 真菌种的丰度、孢子密度级数和物种多样性指数

Table 4 Species richness, spore density and Shannon-Winer index of AM fungi in different sample sites

样地 Sample sites		时间 Time	种的丰度 <i>SR</i> Species Richness /(种/100g 土)	孢子密度 <i>SD</i> Spore Density /(个/100g 土)	Shannon-Winer Index 指数
OSES	沙鞭空地 <i>P. villosa</i> space	入侵前	1.56	7.25	0.2690
		入侵后	3.87	31.25	0.5566
	羊柴空地 <i>H. leave</i> space	入侵前	7.43	277.25	0.8377
		入侵后	10.74	628.25	1.0308
RSCF	沙鞭空地 <i>P. villosa</i> space	入侵前	5.68	207.80	0.7227
		入侵后	8.72	376.75	0.9368
	羊柴空地 <i>H. leave</i> space	入侵前	11.23	479.00	1.0338
		入侵后	9.61	740.50	0.9587

表 5 不同样地土壤中 AM 真菌属的频度

Table 5 Frequency of different genera in the soil of sample sites

样地 Sites		入侵状况 Invasion	<i>Glomus</i>		<i>Acaulospora</i>		<i>Gigaspora</i>		<i>Scutellospora</i>	
			F/%	RA/%	F/%	RA/%	F/%	RA/%	F/%	RA/%
OSES	沙鞭空地 <i>P. villosa</i> space	入侵前	96.4	85.7	12.3	14.3	0	0	0	0
		入侵后	93.4	74.6	15.6	7.7	7.2	5.6	3.4	2.1
	羊柴空地 <i>H. leave</i> space	入侵前	89.7	71.1	23.4	18.5	15.9	10.4	0	0
		入侵后	92.1	76.9	28.2	15.4	17.6	7.7	0	0
RSCF	沙鞭空地 <i>P. villosa</i> space	入侵前	88.4	71.4	10.8	14.7	13.2	13.9	0	0
		入侵后	90.3	62.5	12.6	23.0	15.4	14.5	0	0
	羊柴空地 <i>H. leave</i> space	入侵前	86.2	72.7	11.3	18.2	6.7	9.1	0	0
		入侵后	91.5	83.3	9.8	10.4	8.5	6.3	0	0

3 讨论

在毛乌素沙地,风蚀所造成的异质性环境对靠种子繁殖的非克隆植物是非常不利的,但对靠根茎繁殖的克隆植物的生长扩展是有利的。沙鞭和羊柴均为根茎游击型克隆植物,多年生根茎在沙基质中形成多层密集网络结构,将地上多个分散分布植冠连接起来。在自然状态下,沙鞭分株间距约为 20 cm 左右,而羊柴分株间距达 1 m,同一根茎上相继分株的植冠间通常具有相当大的间隔^[10,12]。本试验结果显示,在同一时期,沙鞭灌丛空地的分株数多于羊柴灌丛空地。主要是由于二者间不同分株间距的原因,在试验观测后期,一些羊柴分株已经超越了标记样方的范围。

在不同的植被演替阶段,菌根真菌的组成和数量有明显变化^[22]。Hashimoto 和 Hyakum- achi 发现,干扰后在演替植被建立的起始阶段,宿主植物白桦侵入之后,菌根的种类和数量均迅速变化^[23]。另有研究表明植物区系和多样性会影响 AM 真菌多样性^[24],植物群落结构不同,AM 真菌群落也会随着变化^[25-26],AMF 和植物群落相互依赖,更倾向于共同变化^[27]。本研究也表明,克隆植物生长侵入对 AM 真菌多样性和丛枝菌根形成都产生一定的影响,并且因克隆植物种类不同而异。沙鞭通过克隆生长侵入灌丛空地后,AM 真菌种类增加,并且丛枝菌根不同结构的定殖率提高;羊柴克隆生长侵入灌丛空地后,AM 真菌的种类没有发生变化,并且丛枝菌根不同结构的定殖率明显下降。推测其原因可能有以下两方面:(1)由于克隆植物根系已与 AM 真菌形成良好的菌根共生体,随着克隆植物侵入灌丛空地,克隆植物根际的土著 AM 真菌群落也随之进入空地,这些外来 AM 真菌的入侵势必会对灌丛空地的原有 AM 真菌群落产生影响,若二者能和谐共处,则表现为 AM 真菌种类的增加和定殖率的提高;相反一方会对另一方产生抑制作用,可能就会表现为 AM 真菌种类无变化或减少及定殖率下降。(2)克隆植物侵入灌丛空地后,由于根系分泌物或丛枝菌根的作用,使灌丛空地土壤的理化性质发生了变化,环境因子是影响 AM 真菌多样性和丛枝菌根发育的一个重要因素,遵循适者生存、不

适者淘汰的原则,故 AM 真菌种类和定殖率发生变化。

在生物群落恢复过程中,AM 真菌不仅深刻地影响着植物系统的生物结构,而且人为地引入 AM 真菌接种剂,能够加速被破坏了的生境中植被的恢复,Requena^[28]等在对西班牙南部地中海地区退化植被的恢复中,采用接种外来 AM 真菌和本地 AM 真菌后的幼苗进行实地移栽,发现接种本地 AM 真菌的植物的植株高度、根际土壤中有机质含量等均较高。因此,当用土著克隆植物对毛乌素沙地生态系统进行植被恢复时,土壤中是否存在与之相应的 AM 真菌就显得尤为重要。而且,作为生态系统的组成部分,菌根真菌的存在和多样性是维持植物多样性和生态系统功能的一个重要因子^[29],而当一种菌根真菌的宿主植物是群落的优势种或建群种时,它的丧失会引起生态系统的重大变化^[30]。因此,在毛乌素沙地采用菌根技术对加速植被恢复,加快生态恢复工程进程有重要意义。

随着克隆植物的入侵和丛枝菌根状态的变化,灌丛空地的土壤营养状况发生了明显改变,特别是速效 N 的变化最为显著,其次是有机质含量的变化。Quintero^[31]和 Hamel^[32]等发现,AM 真菌侵染的植物在短时间内可以增加土壤中有机质含量,改善土壤结构。虽然迄今为止对 AM 真菌直接利用腐败有机物的能力仍有所争议^[33],但 AM 真菌可以显著影响植物根际土壤微生物群落,这些土壤微生物在 N 素矿化过程中起着重要作用^[34]。土壤 N 素很容易在细菌作用下在氧化还原态之间转化,其中的硝态氮(NO_3^-)和铵态氮(NH_4^+)若不能很快被植物同化吸收,则很容易被反硝化细菌还原成 NO_2^- 或 N_2 而逸出土壤生态系统。此时丛枝菌根就通过其在土壤中的网状生长形成大量菌丝而把这些营养物质同化到菌丝体中,从而把这些物质吸收到植物根际土壤中,提高生态系统对土壤资源的利用效率。本研究还发现,克隆植物侵入灌丛空地后,土壤速效 P 含量也有所提高,但速效 K 含量显著下降。关于对土壤营养状况的改变,是克隆植物本身还是丛枝菌根起着更重要的作用,有待深入研究。

References:

- [1] Bai D M, Yu Zh Zh, Li F Q, He W M. The desertification dynamic study of Mao Wu Su deserted land of Inner Mongolia in recent years. *Inner Mongolian Environmental Sciences*, 2008, 20(1): 68-73.
- [2] Prach K, Pysek P. Clonal plants: What is their role in succession? *Folia Geobot Phytotax Praha*, 1994, 29: 307-320.
- [3] Callaghan T V, Jonasson S, Brooker R W. Arctic clonal plants and global change//de Kroon H, van Groenendaal J eds. *The ecology and evolution of clonal plants*. Leiden, the Netherlands: Backbuys Published, 1997: 331-357.
- [4] Peter D S, Williams S E, Martha C. Efficacy of native vesicular arbuscular mycorrhizal fungi after severe soil disturbance. *New Phytologist*, 1988, 110: 347-354.
- [5] Hartnen D C, Wilson G T. Mycorrhiza influence plant community structure and diversity in tall grass prairie. *Ecology*, 1999, 80(4): 1187-1195.
- [6] Klironomos J N, Mcune J, Hart M. The influence of arbuscular mycorrhizae on the relationship between plant diversity and productivity. *Ecology Letters*, 2000, 3: 137-141.
- [7] Department of Geography of Beijing University, Commission for Integrated Survey of Natural Resources of CAS & Lanzhou Institute of Glaciology and Cryopedology of CAS. *Natural conditions of Mao wu su Sands and its improvement*. Beijing: Science Press, 1983: 72-113.
- [8] Yin Z B. *Gehas Psammochloa villosa*//Ma Y. Q. ed *Flora of Inner Mongolia* (vol 15). 2nd edition, Hohhot: InnerMongolia People Press, 1994: 115-152.
- [9] Fowler N. The effects of environmental heterogeneity in space and time on the regulation of populations and communities. In: Davy AJ, Hutchings MJ and Watkinson AR. Eds. *Plant population ecology*. Oxford: Blackwell Scientific Publications, 1988: 249-269.
- [10] Dong M, Alateng B, Xing X R, Wang Q B. Genet features and ramet population features in the rhizomatous grass species psammochloa villosa. *Journal of Plant Ecology*, 1999, 23 (4): 302-310.
- [11] Ma Y Q. *Flora of Inner Mongolia*. Hohhot: Inner Mongolia People Press, 1989: 339.
- [12] Chen Y F, Dong M. Genet characters of hedysatum laeve and the characters of its ramet population in different habitats in Mu Us sandland. *Journal of Plant Ecology*, 2000, 24(1): 40-45.
- [13] Roels B, Donders S, Werger M. Relation of wind-induced sand displacement to plant biomass and plant sand-binding capacity. *Acta Botanica Sinica*, 2001, 43: 979-982.
- [14] Schenck N C, Perez Y. *Manual for the identification of VA mycorrhizal fungi*. 2nd edition, FNVAM Gainesville, Florida, 1988, 91-97.

- [15] Olsen S R, Cole C V, Watanabe F S. Estimation of available phosphorus in soils by extraction with sodium bicarbonate. US Dept Agric Circ, 1954, 939.
- [16] Murphy J, Riley J P. A modified single solution method for the determination of phosphate in natural waters. Anal Chim Acta, 1962, 27: 31-36.
- [17] Jackson M L. Analisis quimico de suelos, 3rd edition. Omega, Barcelona, 1976.
- [18] Daniels B A and Skipper H D. Methods for the recovery and quantitative of mycorrhizal research // Methods and principles of mycorrhizal research. The American Photopathology Society. St. Pal. USA. 1982, 186-189.
- [19] Zhang M Q, Wang Y S, Xing L J. The ecological distribution of AM fungi community in south and east coast of China. Mycosystema, 1998, 17(3): 274-277.
- [20] Phillips J M, Hayman D S. Improves procedures for clearing roots and staining parasitic and vesicular-arbuscular mycorrhizal fungi for rapid assessment of infection. Transactions of the British Mycological Society, 1970, 55: 158-160.
- [21] Abbott L K, Robson A D, De Boer G. The effect of phosphorus on the formation of hyphae in soil by vesicular-mycorrhizal fungus, *Glomus fasciculatum*. New Phytologist, 1984, 97: 437-446.
- [22] Barni E, Siniscalco C. Vegetation dynamics and arbuscular mycorrhiza in old-field successions of the western Italian Alps. Mycorrhiza, 2000, 10: 63-72.
- [23] Hashimoto Y and Hyakumachi M. Quantities and types of ectomycorrhizal and endophytic fungi associated with *Betula platyphylla* var. *japonica* seedlings during the initial stage of establishment of vegetation after disturbance. Ecological Research, 2000, 15: 21-31.
- [24] Johnson D, Vandenkoomhuyse P J, Leake J R. Plant communities affect arbuscular mycorrhizal fungal diversity and community composition in grassland microcosms. New Phytologist, 2004, 161: 503-515.
- [25] Vandenkoomhuyse P, Ridgway K P, Watson I J. Co-existing grass species have distinctive arbuscular mycorrhizal communities. Molecular Ecology, 2003, 12: 3085-3095.
- [26] Hart M M, Reader R J, Klironomos J N. Life-history strategies of arbuscular mycorrhizal fungi in relation to their successional dynamics. Mycologia, 2001, 93: 1186-1194.
- [27] Jansa J, Mozafar A, Anken T. Diversity and structure of AMF communities as affected by tillage in a temperate soil. Mycorrhiza, 2002, 12: 225-234.
- [28] Requena N, Perezsolis E, Azcón Aguilar C. Management of indigenous plant-microbe symbioses aids restoration of desertified ecosystems. Appl Environ Microbiol, 2001, 67(2): 495-498.
- [29] Vander Heijden MGA, Klironomos J N, Ursic M. Mycorrhizal fungal diversity determines plant biodiversity, ecosystem variability and productivity. Nature, 1998, 396: 69-72.
- [30] Hawksworth D L. The fungal dimension of biodiversity: Magnitude, significance and conservation. Mycological Research, 1991, 95: 641-655.
- [31] Quintero Ramos M. Fitting plants to soil through mycorrhizal fungi: mycorrhiza effects on plant growth and soil organic matter. Biol. Fertil. Soils, 1993, 15: 103-106.
- [32] Hamel C. Impact of arbuscular mycorrhizal fungi on N and P cycling in the root zone. Can J Soil Sci, 2004, 84: 383-395.
- [33] Talbot J M, Allison S D, Treseder K K. Decomposers in disguise: mycorrhizal fungi as regulators of soil C dynamics in ecosystems under global change. Funct Ecol, 2008, 22: 955-963.
- [34] Aneja M, Sharma S, Fleischmann F. Microbial colonization of beech and spruce litter-influence of decomposition site and plant litter species on the diversity of microbial community. Microb Ecol, 2006, 52: 127-135.

参考文献:

- [1] 白冬梅, 于智忠, 李凤琴, 何文明. 内蒙古毛乌素沙地近年荒漠化动态研究. 内蒙古环境科学, 2008, 20(1): 68-73.
- [7] 北京大学地理系, 中国科学院自然资源综合考察委员会, 中国科学院兰州冰川冻土研究所. 毛乌素沙区自然条件及其改良利用. 北京: 科学出版社, 1983: 72-113.
- [8] 音扎布. 沙鞭 // 马毓泉主编. 内蒙古植物志(第15卷), 第二版. 呼和浩特: 内蒙古人民出版社, 1994: 115-152.
- [10] 董鸣, 阿拉腾宝, 邢雪荣, 王其兵. 根茎禾草沙鞭的克隆基株及分株种群特征. 植物生态学报, 1999, 23(4): 302-310.
- [11] 马毓泉. 内蒙古植物志. 呼和浩特: 内蒙古人民出版社, 1989: 339.
- [12] 陈玉福, 董鸣. 毛乌素沙地根茎灌木羊柴的基株特征和不同生境中的分株种群特征. 植物生态学报, 2000, 24(1): 40-45.
- [19] 张美庆, 王幼珊, 刑礼军. 我国东南沿海地区 AM 真菌群落生态分布研究. 菌物系统, 1998, 17(3): 274-277.