

科尔沁沙地不同演替阶段冷蒿群落的结构特征*

李衍青^{1,2**} 孙英杰³ 张铜会² 赵爱芬³ 连杰²

(¹ 中国地质科学院岩溶地质研究所, 广西桂林 541004; ² 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所, 兰州 730000; ³ 鲁东大学生命科学学院, 山东烟台 264025)

摘要 采用空间序列替代时间序列的方法,对科尔沁沙地不同演替阶段3个冷蒿群落的物种组成和物种多样性进行研究。结果表明:处于3个演替阶段的冷蒿群落为杠柳-冷蒿群落、杠柳-冷蒿+差巴嘎蒿群落及冷蒿-糙隐子草群落。3个冷蒿群落均以菊科、禾本科和藜科植物占优势。随着群落的演替,群落植物种数和科数逐渐减小,禾本科植物的种数逐渐减小,但菊科和禾本科植物种数所占比例逐渐增大。3个冷蒿群落中物种多样性顺序为:杠柳-冷蒿+差巴嘎蒿群落>杠柳-冷蒿群落>冷蒿-糙隐子草群落。3个冷蒿群落间的物种组成差异不大,群落间物种相似度较高。3个群落中冷蒿的盖度最大,其盖度随着群落的演替逐渐增大。

关键词 科尔沁沙地 冷蒿群落 群落演替 物种多样性 相似度

文章编号 1001-9332(2011)07-1725-06 中图分类号 Q948.15 文献标识码 A

Structural characteristics of *Artemisia frigid* community at different succession stages in Horqin Sandy Land. LI Yan-qing^{1,2}, SUN Ying-jie³, ZHANG Tong-hui², ZHAO Ai-fen³, LIAN Jie² (¹Institute of Karst Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Guilin 540014, Guangxi, China; ²Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China; ³School of Life Science, Ludong University, Yantai 264025, Shandong, China). -*Chin. J. Appl. Ecol.*, 2011, 22(7): 1725-1730.

Abstract: Taking space as a substitute for time, this paper studied the species composition and species diversity of *Artemisia frigid* community at three succession stages in Horqin Sandy Land. The three succession stages were *Periploca sepium*-*A. frigid*a community, *Periploca sepium*-*A. frigid*a+*A. halodendron* community, and *A. frigid*a-*Cleistogenes squarrosa* community, all dominated by the plants of Compositae, Chenopodiaceae and Gramineae. The species number and family number in the communities and the species number of Gramineae decreased with succession, while the percentages of Compositae and Gramineae species increased. The species diversity of the communities was in the order of *P. sepium*-*A. frigid*a+*A. halodendron* > *P. sepium*-*A. frigid*a > *A. frigid*a-*C. squarrosa*. No obvious difference was observed in the species composition among the three communities. In the three communities, *A. frigid*a had the highest coverage, and the coverage increased with succession.

Key words: Horqin Sandy Land; *Artemisia frigid* community; community succession; species diversity; similarity.

科尔沁沙地位于我国北方半干旱农牧交错区生态脆弱带内。特殊的气候特征和土地过垦、超载放牧等人为干扰导致该地区植被被大量破坏、土地荒漠化严重,因此植被恢复成为科尔沁沙地退化生态系统重建的重要任务。草原是该地区典型的地带性稳

定植被类型,在植被恢复、土地荒漠化治理及畜牧业生产中具有重要的地位和作用。沙地生态系统恢复过程伴随着植被发育和群落演替,群落的物种组成及生物多样性随着演替的进展发生变化。在该区域的荒漠化治理过程中,根据地表植被状况的不同,采取了封育、人工栽植固沙植物等不同措施,所以植物群落的演替和结构也有所不同。冷蒿(*Artemisia frigid*a)作为沙地植物群落演替后期出现的优势种及草原指示种,在科尔沁沙地生态系统恢复过程中尤其

* 国家自然科学基金项目(40902074, 40871004)、国家重点基础研究发展计划项目(2009CB421303)和广西科技厅项目(桂科攻114002-3-1)资助。

** 通讯作者。E-mail: lyq@karst.ac.cn

2011-01-17 收稿,2011-04-21 接受。

是群落演替后期发挥着重要作用,其数量伴随着演替的各个阶段而变化,这种变化对群落结构与功能有重要影响。

国内外对群落演替的研究主要集中在植物演替过程中土壤特性和种子库^[1-6]、植物种群格局及生态位^[7-10]、不同植物群落的结构特征^[11-15]等方面。关于科尔沁沙地植物群落演替动态中的差巴嘎蒿(*Artemisia halodendrom*)群落^[12]、油蒿(*Artemisia ordosica*)群落^[14]、羊草(*Leymus chinensis*)群落^[15]也有研究,但有关不同群落演替阶段上冷蒿群落特性的研究较少。本文以空间序列替代时间序列的方法^[16-17],对科尔沁沙地生态系统中3个群落演替阶段冷蒿群落的结构特征进行研究,对冷蒿群落的物种组成、垂直结构、形成原因及群落发展趋势进行分析,以期为科尔沁沙地的植被恢复和土地荒漠化治理提供理论依据。

1 研究地区与研究方法

1.1 研究区概况

研究区位于内蒙古奈曼旗境内(42°41' N, 120°55' E),海拔360 m。该区属于温带半干旱大陆性气候,年均气温6.5℃,1月平均气温-12.7℃,7月平均气温23.7℃,≥10℃年积温3200℃,无霜期150 d。年均降水量362.3 mm,主要集中在6—8月,蒸发量1935.4 mm,雨热同季。年均风速3.2~4.0 m·s⁻¹,8级以上大风年均21次,其中沙尘暴天气10~15 d,主要出现在春季。土壤贫瘠,主要为风沙土、沙质栗钙土、沙质草甸土和沼泽土^[18]。

1980年以前该区沙漠化严重,形成了以流动和半流动沙丘为主的地貌类型,原生植被受到破坏,乔木层基本消失,草本层退化,灌木层发育强烈,地表植被盖度<20%。经过30多年的综合治理,生态环境明显改善,植被盖度增加到50%以上,主要以灌木、半灌木、草本植物组成的沙生植物为主,由菊科、禾本科、豆科、藜科、蒴藜科、蓼科植物组成。主要植物种类有小叶锦鸡儿(*Caragana microphylla*)、杠柳(*Periploca sepium*)、黄柳(*Salix gordevii*)、差巴嘎蒿、冷蒿、黄蒿(*Artemisia scoparia*)、猪毛菜(*Salsola collina*)、糙隐子草(*Cleistogenes squarrosa*)和狗尾草(*Setaria viridis*)等。

研究样地设在中国科学院奈曼沙漠化研究站的放牧实验围栏、流动沙丘恢复实验围栏和气象站附近,分别以A、B、C表示,代表沙漠化恢复过程中冷蒿群落演替的3个阶段。

A群落位于放牧围栏附近,处于典型恢复过程中的半固定沙丘。土壤为沙质土,有风蚀,地表形成浅风蚀坑。植被类型属于杠柳-冷蒿群落。该样地与玉米地、杨树人工林、放牧实验围栏毗邻,受人类活动影响较大。主要灌木为杠柳,主要小半灌木为冷蒿、差巴嘎蒿,主要草本植物为黄蒿、雾冰藜(*Bassia dasyphylla*)和灰绿藜(*Chenopodium glaucum*)。冷蒿成大面积斑块状分布,在群落中心密集生长,从中心到群落边缘,冷蒿密度逐渐变小并呈现向外分散生长的趋势。

B群落位于流动沙丘恢复实验围栏外的固定沙丘。该样地20世纪80年代初为流动沙丘,通过人工栽植差巴嘎蒿固沙治理,现发展为杠柳-冷蒿+差巴嘎蒿群落。土壤为沙质土,无结皮。冷蒿呈大面积斑块状分布,群落中心的主要植物为冷蒿,有少量的差巴嘎蒿、小叶锦鸡儿、杠柳、地锦(*Euphorbia humifusa*)、狗尾草等,边缘有较多的冠芒草(*Enneapogon brachystachyus*)、虫实(*Corispermum macrocarpum*)、猪毛菜等一年生草本植物。

C群落位于气象站附近的固定沙丘及丘间低地。该样地原为半固定沙丘,1992年进行栽植差巴嘎蒿和冷蒿固沙治理,并严格限制放牧和人为干扰,现恢复为冷蒿-糙隐子草群落。土壤形成结皮,因此比样地A、B更稳定,无风蚀现象。冷蒿生长状态较好,为优势种;差巴嘎蒿几乎退出群落,仅剩余几株;糙隐子草和狗尾草等一年生草本植物较多。群落中还出现了较多豆科植物,如达乌里胡枝子(*Lespedeza davurica*)和扁蓿豆(*Melissitus ruthenicus*)等。

1.2 研究方法

2009年6—7月,在A、B、C样地上分别布设相互平行的3条50 m样线,样线间距10 m。在样线上每隔5 m取1个1 m×1 m的草本样方,每个样地取30个样方(其中10个详细样方和20个记名样方)。记录每个详细样方中植物的种类、数量、高度,记录每个记名样方中的物种名。同时记录每条样线上灌木的种类、数量及其在样线上所占的位置和长度(代表灌木的盖度)。

1.3 数据处理

以重要值表示某一植物种在群落中的地位和作用^[13,19]:

重要值(IV) = (相对密度 + 相对高度 + 相对频度) / 3

相对密度 = (样方内种 i 的密度 / 样方内所有种的密度和) × 100

相对高度 = (样方内种 i 的高度 / 样方内所有种的高度) $\times 100$

相对频度 = (样方内种 i 的频度 / 样方内所有种的频度和) $\times 100$

以物种丰富度指数 (R)、香农指数 (Shannon index, H) 表示群落的多样性^[20-22], 采用 Sorensen 指数^[23] 计算群落的相似度, Pielou 指数 (E) 计算群落的均匀度:

$$R = S$$

$$H = - \sum_{i=1}^S P_i \ln P_i$$

$$C = Z_j / (a + b)$$

$$E = H / \ln S$$

式中: S 为群落的物种数; P_i 为第 i 个物种的个体数在全部物种中的比例, $P_i = N_i / N$, N_i 为第 i 个物种的个体数, N 为群落中全部物种的个体数; Z_j 为 2 个群落的共有种在各个群落中重要值的总和; a 和 b 分别为 2 个群落中所有种的重要值总和。

2 结果与分析

2.1 3 个冷蒿群落物种科组成的差异

在沙漠化恢复过程中, 不同阶段群落的物种组成不断发生变化, 科组成也表现出一定的规律性。由表 1 可看出, A 群落有植物 26 种, 隶属于 11 科, 其中, 菊科和禾本科植物占优势, 占群落总种数的 46.2%, 藜科次之, 占 15.4%; B 群落有植物 22 种, 隶属于 9 科, 与 A 群落相似, B 群落中菊科和禾本科植物占优势, 藜科次之, 但藜科植物占 18.2%, 比 A 群落多, 而且 B 群落没有蓼科和伞形科植物; C 群落

有植物 20 种, 隶属于 8 科, 其中, 菊科、豆科、藜科和禾本科植物占植物种数的 80.0%, 没有蓼科、紫草科和伞形科植物。

总体来看, 3 个群落中菊科和禾本科植物的种数接近, 从 A 群落到 B 群落再到 C 群落, 禾本科植物种数逐渐减少, 而且群落总种数和科数逐渐减少。这可能与冷蒿的种群扩散和斑块状聚集以及冷蒿的强竞争能力有关, 也与 3 个群落的地理位置有关, A 和 B 群落分布于容易受到人类活动和牲畜践踏干扰的地方, 而 C 群落属于保护较好的恢复沙丘。

2.2 3 个冷蒿群落物种重要值的差异

沙地植被恢复过程中植被演替是植物群落组成、结构、功能变化与沙地生境水热条件、养分状况、紧实度等理化性质变化相互作用和相互反馈的结果。采用重要值作为物种优势度指标可以比较全面地反映植被不同演替阶段种群在群落中的功能地位和分布格局^[24]。

由表 2 可以看出, 冷蒿和杠柳为 A 群落灌木层的共优种, 雾冰藜为草本层的优势种; B 群落灌木层和草本层的优势种分别为杠柳和雾冰藜, C 群落则分别为冷蒿和狗尾草。冷蒿在 C 群落中重要值最大, 差巴嘎蒿的重要值在 3 个群落中变化不大。狗尾草和糙隐子草的重要值在 3 个群落中表现为: A 群落 < B 群落 < C 群落, 这可能是因为二者为禾本科植物, 其根系为须根系, 根量大, 在土壤中分布较密集。随着植物群落的演替, 禾本科植物的重要值不断增大, 功能地位在群落中不断提高, 在很大程度上能促进沙地表层土壤的固定, 使荒漠植物群落向草原群

表 1 3 个冷蒿群落物种的科组成

Table 1 Family composition of species in the three *Artemisia frigida* communities

科 Family	A		B		C	
	种数 Species number	比例 Percentage	种数 Species number	比例 Percentage	种数 Species number	比例 Percentage
菊科 Compositae	6	23.1	5	22.7	5	25.0
豆科 Leguminosae	2	7.7	2	9.1	4	20.0
藜科 Chenopodiaceae	4	15.4	4	18.2	4	20.0
萝藦科 Asclepiadaceae	2	7.7	2	9.1	1	5.0
禾本科 Gramineae	6	23.1	5	22.7	3	15.0
蓼科 Polygonaceae	1	3.8	-	-	-	-
大戟科 Euphorbiaceae	1	3.8	1	4.5	1	5.0
紫草科 Boraginaceae	1	3.8	1	4.5	-	-
蒺藜科 Zygophyllaceae	1	3.8	1	4.5	1	5.0
伞形科 Umbelliferae	1	3.8	-	-	-	-
牻牛儿苗科 Geraniaceae	1	3.8	1	4.5	1	5.0
总计 Total	26	100	22	100	20	100

A: 杠柳-冷蒿群落 *Periploca sepium-Artemisia frigida* community; B: 杠柳-冷蒿+差巴嘎蒿群落 *Periploca sepium-Artemisia frigida+Artemisia halodendron* community; C: 冷蒿-糙隐子草群落 *Artemisia frigida-Cleistogenes squarrosa* community. 下同 The same below.

表2 3个冷蒿群落的物种重要值
Table 2 Importance value of species in the three *Artemisia frigida* communities

层次 Layer	物种 Species	群落 Community		
		A	B	C
灌木层 Shrub layer	杠柳 <i>Periploca sepium</i>	64.2	63.7	-
	冷蒿 <i>Artemisia frigida</i>	68.3	55.0	88.8
	差巴嘎蒿 <i>Artemisia halodendrom</i>	53.4	55.2	47.4
	小叶锦鸡儿 <i>Caragana microphylla</i>	-	54.7	34.0
草本层 Herb layer	东北木蓼 <i>Atraphaxis manshurica</i>	24.8	-	-
	黄蒿 <i>Artemisia scoparia</i>	41.3	36.0	15.8
	大籽蒿 <i>Artemisia sieversiana</i>	-	-	26.0
	薊 <i>Cirsium japonicum</i>	14.4	16.8	-
	细叶苦苣菜 <i>Ixetis denticulata</i>	7.8	9.6	-
	砂蓝刺头 <i>Echinops gmelini</i>	13.6	-	7.5
	苦参 <i>Sophora alopecuroides</i>	-	-	28.1
	达乌里胡枝子 <i>Lespedeza davurica</i>	21.3	14.6	46.8
	扁蓿豆 <i>Melissitus ruthenicus</i>	-	-	12.7
	雾冰藜 <i>Bassia dasyphylla</i>	52.3	49.3	15.2
	虫实 <i>Corispermum macrocarpum</i>	23.9	32.1	28.0
	灰绿藜 <i>Chenopodium glaucum</i>	16.3	16.2	4.6
	猪毛菜 <i>Salsola collina</i>	22.9	36.1	34.6
	地锦 <i>Euphorbia humifusa</i>	4.7	31.8	25.1
	鹤虱 <i>Lappula myosotis</i>	7.5	14.3	-
	防风 <i>Saposhnikovia divaricata</i>	11.7	-	-
地梢瓜 <i>Cynanchum thesiodes</i>	5.2	23.1	19.4	
蒺藜 <i>Tribulus terrestris</i>	32.5	12.9	4.0	
太阳花 <i>Erodium stephanianum</i>	5.2	9.9	4.5	
狗尾草 <i>Setaria viridis</i>	16.0	31.0	51.0	
糙隐子草 <i>Cleistogenes squarrosa</i>	10.7	14.7	41.6	
冠芒草 <i>Enneapogon brachystachyus</i>	39.1	31.9	-	
马唐 <i>Digitaria ischaemum</i>	20.3	18.1	10.8	
针茅 <i>Stipa capillata</i>	7.2	14.7	-	
稗草 <i>Echinochloa crusgalli</i>	6.3	-	-	

表3 3个冷蒿群落的物种多样性
Table 3 Species diversity in the three *Artemisia frigida* communities

层次 Layer	指数 Index	群落 Community		
		A	B	C
灌木层 Shrub layer	Shannon 指数	1.06	1.35	0.48
	Shannon index (H)			
	Pielou 指数 Pielou index (E)	0.76	0.97	0.43
草本层 Herb layer	Shannon 指数	1.61	1.89	1.86
	Shannon index (H)			
	Pielou 指数 Pielou index (E)	0.53	0.65	0.66

表4 3个冷蒿群落中灌木层植物的分布
Table 4 Distribution of plants in shrub layer in the three *Artemisia frigida* communities

物种 Species	丛幅 Canopy (m)			投影长度 Projected length (m)			盖度 Coverage (%)		
	A	B	C	A	B	C	A	B	C
冷蒿 <i>Artemisia frigida</i>	0.28	0.45	0.38	15.75	24.19	47.80	10.5	16.1	31.9
杠柳 <i>Periploca sepium</i>	0.53	0.67	-	28.60	17.95	-	19.1	12.0	-
差巴嘎蒿 <i>Artemisia halodendrom</i>	0.66	0.54	0.78	6.60	29.95	8.60	4.4	20.0	5.7
小叶锦鸡儿 <i>Caragana microphylla</i>	0.63	1.14	1.01	4.40	8.80	4.05	2.9	5.9	2.7
东北木蓼 <i>Atraphaxis manshurica</i>	-	1.70	-	-	1.70	-	-	1.1	-

落方向发展. C 群落中冷蒿和禾本科植物重要值的增大反映出该群落趋向于草原化发展.

2.3 3个冷蒿群落物种多样性的差异

A 与 B 群落的 Sorensen 指数为 0.92, A 与 C 群落为 0.75, B 与 C 群落为 0.80, 可见 3 个冷蒿群落间的物种组成差异不大, 群落间物种相似度较高. 由表 3 可以看出, 从 A 群落到 B 群落再到 C 群落, 灌木层的 Shannon 指数和 Pielou 指数均呈先增后减的趋势, 即随着群落演替的发展, 植物群落的结构趋于复杂化, 但在 C 群落阶段, 冷蒿大量增加并成为优势种, 其高优势度导致群落物种丰富度降低. 与灌木层相比, 草本层的 Shannon 指数和 Pielou 指数在 3 个群落中的差异不大, 其中, Shannon 指数先增后减, Pielou 指数逐渐增大.

2.4 3个冷蒿群落灌木层物种的分布特征

植物生长所需要的光、水分、矿质养分等在空间上的分布呈斑块状, 这种斑块性是生物和非生物异质性的共同结果. 如风蚀干扰、人类放牧活动、植物的种内和种间竞争等因素^[25] 会导致许多灌木层植物的分布呈不同面积大小的斑块状, 形成“肥岛效应”^[26].

在 3 个群落中, 杠柳和小叶锦鸡儿多呈随机分布, 冷蒿和差巴嘎蒿多数呈集群分布. 由表 4 可以看出, 冷蒿的丛幅比其他 4 种植物小, 这是因为冷蒿为小半灌木, 而且在沙丘固定后才逐渐增多成为优势种, 因此其个体平均丛幅比其他 4 种植物小. 整体来看, 3 个群落中冷蒿的盖度最大, 其次是杠柳、差巴嘎蒿. 差巴嘎蒿在 3 个群落中都存在, 且在 B 群落中的盖度最大, 达 20%. 这可能与三者的生态幅不同有关, 冷蒿主要在沙丘固定后的群落演替后期出现, 杠柳主要生长于半固定和固定沙丘, 而差巴嘎蒿的生态幅较广, 能存在于沙丘固定的各阶段中. 冷蒿、差巴嘎蒿等植物灌丛所形成的“肥岛”改善了群落小生境的土壤理化性质, 并为其他植物的生长发育创造了条件.

3 讨 论

刘新民等^[18]认为,科尔沁沙地植被的总体演替模式为:沙蓬(*Agriophyllum squarrosum*)群落-差巴嘎蒿群落和黄柳(*Salix gordejvii*)群落-冰草(*Agropyron cristatum*)草原或糙隐子草草原或羊草草原-灌丛化草原-榆树疏林草原.其阶段性特征为沙丘固定过程和草原化过程,前者沙地先锋植物的作用比较突出,后者草原植物成分的作用逐渐增加.沙地植被的动态变化既遵循植被演替的一般规律,又有其特殊性,即人类的正向干预更易使其超越演替阶段发育.本研究中,3个冷蒿群落是由在流动和半流动沙丘上人工建立的固沙先锋灌木差巴嘎蒿群落和差巴嘎蒿+冷蒿群落发展而来,现阶段植物群落演替均处于灌丛化草原阶段.由3个群落的相似性系数可以看出,群落之间的相似性较高,能否发展到榆树疏林阶段,不仅取决于群落内部的发展动力,也依赖于环境条件,如沙地植被的持续保护、降水条件等.

从A群落到B群落再到C群落,大部分植物的比例均逐渐增加(表1),禾本科植物的比例逐渐降低,但禾本科植物的重要值逐渐增大(表2).这反映出3个群落逐渐向更稳定的草原化方向发展,但由于群落发展的时间较短,3个群落的阶段性并不明显.3个群落的物种丰富度逐渐减小,这与冷蒿、达乌里胡枝子、糙隐子草等克隆植物的高优势度有关^[19].此外,3个群落的物种多样性顺序为:群落B>群落A>群落C,这可能是由于所选样地沙丘固定后部分先锋植物和一年生植物退出,而演替后期群落的物种因种源缺乏和时间较短而未侵入,从而导致A群落和C群落物种多样性比B群落低.

本研究结果表明,差巴嘎蒿存在于整个群落演替过程的每个阶段,而冷蒿在半固定沙丘中开始呈现斑块状分布,并逐渐发展成为群落的优势种.这与周海燕和赵爱芬^[27]研究发现的冷蒿在科尔沁沙地的流动沙丘和半固定沙丘阶段不出现或仅为偶见种的结论不同,具体原因有待进一步研究.但总的来说,随着沙丘的逐步固定,冷蒿在群落中的作用越来越重要,逐渐取代差巴嘎蒿成为群落的优势种,并在受到保护的恢复样地内呈大面积斑块状分布.这是因为与差巴嘎蒿相比,冷蒿的枝条更柔软,更耐沙埋,而且生理上也更耐旱^[28];并且冷蒿具有独特的繁殖适应对策,不仅能够产生大量的种子进行有性繁殖,而且还能够产生匍匐枝条进行克隆繁殖,从而在资源竞争和种间竞争上占据更大优势.因此,建议

在荒漠化地区除采取封育和禁牧的措施外,还可以在沙丘上混种差巴嘎蒿和小叶锦鸡儿,并在半固定沙丘、固定沙丘上种植冷蒿及禾草类植物进一步使沙丘得到固定,达到促使沙地植被恢复并向草原化方向发展的目的.

参考文献

- [1] Jiang D-M (蒋德明), Cao C-Y (曹成有), Li X-H (李雪华), et al. Vegetation restoration and its effects on soil improvement in Horqin Sandy Land. *Ecology and Environment* (生态环境), 2008, **17**(3): 1135-1139 (in Chinese)
- [2] Wu Y-N (乌云娜), Pei H (裴浩), Ran C-Q (冉春秋), et al. Change of the community structure and soil physical and chemical property during vegetation restoration succession in Kerqin Sandland. *Journal of Anhui Agricultural Sciences* (安徽农业科学), 2008, **36**(15): 6471-6475 (in Chinese)
- [3] Su Y-Z (苏永中), Zhao H-L (赵哈林), Zhang T-H (张铜会), et al. Characteristics of plant community and soil properties in the plantation chronosequence of *Caragana microphylla* in Horqin Sandy Land. *Acta Phytocologica Sinica* (植物生态学报), 2004, **28**(1): 93-100 (in Chinese)
- [4] Pang X-Y (庞学勇), Liu Q (刘庆), Liu S-Q (刘世全), et al. Influence of plant community succession on soil biological properties during subalpine coniferous plantation rehabilitation in western Sichuan. *Journal of Soil and Water Conservation* (水土保持学报), 2004, **18**(3): 45-48 (in Chinese)
- [5] Gao X-M (高贤明), Huang J-H (黄建辉), Wan S-Q (万师强), et al. Ecological studies on the plant community succession on the abandoned cropland in Taibaishan, Qinling Mountains. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 1997, **17**(6): 619-625 (in Chinese)
- [6] Walker LR, Shiels AB. Post-disturbance erosion impacts carbon fluxes and plant succession on recent tropical landslides. *Plant and Soil*, 2006, **313**: 205-216
- [7] Zhang J-Y (张继义), Zhao H-L (赵哈林), Zhang T-H (张铜会), et al. Niche dynamics of main populations of plants communities in the restoring succession process in Horqin Sandy Land. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2003, **23**(12): 2741-2746 (in Chinese)
- [8] Fu X (傅星), Nan Y-G (南寅镐). Population patterns of main communities on halomorphic meadow of Horqin Sandy Land. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 1992, **3**(4): 313-320 (in Chinese)
- [9] Wang W (王伟), Liang C-Z (梁存柱), Liu Z-L (刘钟龄), et al. Analysis of the plant individual behavior during the degradation and restoring succession in steppe community. *Acta Phytocologica Sinica* (植物生态学报), 2000, **24**(3): 268-274 (in Chinese)
- [10] Jin Q-H (金启宏). Population character of *Alhagi sparsifolia*

- folia and plant community succession. *Acta Phytocologica Sinica* (植物生态学报), 1995, **19**(3): 255–260 (in Chinese)
- [11] Li Y-L (李玉霖), Meng Q-T (孟庆涛), Zhao X-Y (赵学勇), *et al.* Characteristics of species composition and plant diversity in the process of vegetation restoration on moving dunes in the Kerqin Sandy Land. *Acta Prataculturae Sinica* (草业学报), 2007, **16**(6): 54–61 (in Chinese)
- [12] Yin H (尹航), Piao S-J (朴顺姬), Wang Z-J (王振杰), *et al.* Ecological characteristics of *Artemisia halodendron* community and population on Horqin Sandy Land. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2006, **17**(7): 1169–1173 (in Chinese)
- [13] Zhang J-Y (张继义), Zhao H-L (赵哈林), Zhang T-H (张铜会), *et al.* Dynamics of species diversity of communities in restoration processes in Horqin sandy land. *Acta Phytocologica Sinica* (植物生态学报), 2004, **28**(1): 86–92 (in Chinese)
- [14] Xu C-L (徐彩琳), Li Z-Z (李自珍). Succession pattern of artificial vegetation community and its ecological mechanism in an arid desert region. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2003, **14**(9): 1451–1456 (in Chinese)
- [15] Baoyin T (宝音陶格涛), Liu M-L (刘美玲), Li X-L (李晓兰). The study on dynamics succession of community in degenerated steppe of *Leymus chinensis* after shallow ploughing. *Acta Phytocologica Sinica* (植物生态学报), 2003, **27**(2): 270–277 (in Chinese)
- [16] Wang Q-S (王庆锁), Dong X-J (董学军), Chen X-D (陈旭东), *et al.* Study on some features of *Artemisia ordosica* community at the different successional stages. *Acta Phytocologica Sinica* (植物生态学报), 1997, **21**(6): 531–538 (in Chinese)
- [17] Wang X-T (王鑫厅), Wang W (王伟), Liang C-Z (梁存柱). Changes in the population spatial distribution pattern of *Leymus chinensis* in degraded steppe community during restorative succession in Inner Mongolia, China. *Chinese Journal of Plant Ecology* (植物生态学报), 2009, **33**(1): 63–70 (in Chinese)
- [18] Liu X-M (刘新民), Zhao H-L (赵哈林), Zhao A-F (赵爱芬). Wind-sandy Environment and Vegetation in the Horqin Sandy Land. Beijing: Science Press, 1996 (in Chinese)
- [19] Zhang J-Y (张继义), Zhao H-L (赵哈林), Cui J-Y (崔建垣), *et al.* Effects of clonal plants on community structure and function along a restorational gradient in Horqin Sandy Land. *Scientia Silvae Sinicae* (林业科学), 2005, **41**(1): 5–9 (in Chinese)
- [20] Chang X-L (常学礼), Zhao H-L (赵哈林), Yang C (杨持), *et al.* Influence of plant species diversity on productivity of sandy grassland in Kerqin region. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2000, **11**(3): 395–398 (in Chinese)
- [21] Qian Y-Q (钱迎倩), Ma K-P (马克平). Principles and Methodologies of Biodiversity Studies. Beijing: China Science and Technology Press, 1994 (in Chinese)
- [22] Song C-Y (宋创业), Guo K (郭柯), Liu G-H (刘高焕). Relationships between plant community's species diversity and soil factors on Otingdag sandy land. *Chinese Journal of Ecology* (生态学杂志), 2008, **27**(1): 8–13 (in Chinese)
- [23] Yang Z-G (杨志国), Zhao X-H (赵秀海), Zhou X-M (周效明), *et al.* Structure characteristics of plant community in small-sized sand of western Beijing at different successional stages. *Forest Research* (林业科学研究), 2008, **21**(2): 188–193 (in Chinese)
- [24] Jiang F-Q (姜凤岐), Cao C-Y (曹成有), Zeng D-H (曾德慧), *et al.* Ecological Degradation and Restoration of Ecosystem in Horqin Sandy Land. Beijing: China Forestry Press, 2002 (in Chinese)
- [25] Zhou Q-L (周全来), Jiang D-M (蒋德明). Soil phosphorus cycling on sandy lands: A review. *Chinese Journal of Ecology* (生态学杂志), 2009, **28**(10): 2117–2122 (in Chinese)
- [26] Zuo X-A (左小安), Zhao X-Y (赵学勇), Zhao H-L (赵哈林), *et al.* Effects of shrub on understory herbaceous plants and soil properties in the restoration processes of degraded vegetation in Horqin Sand Land. *Ecology and Environmental Sciences* (生态环境学报), 2009, **18**(2): 643–647 (in Chinese)
- [27] Zhou H-Y (周海燕), Zhao A-F (赵爱芬). Ecophysiological characteristics and their competition mechanism of the two dominant grasses in Horqin Sandy Land: *Artemisia halodendron* and *Artemisia frigida*. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2002, **22**(6): 894–900 (in Chinese)
- [28] Zhou H-Y (周海燕). Physioecological characteristics of four dominant plant species in Horqin Sandy Land. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2000, **11**(4): 587–590 (in Chinese)

作者简介 李衍青,男,1982年生,助理研究员.主要从事恢复生态学恢复生态学研究. E-mail: lyq@karst. ac. cn.

责任编辑 孙菊
