

典型草原自然恢复演替过程中植物群落动态变化

邵新庆, 王 堃*, 王贇文, 刘贵河

(中国农业大学动物科技学院, 北京 100094)

摘要:以内蒙古巴林右旗退化典型草原为研究对象,采用空间序列代替时间序列的方法,探讨了在围封去除干扰条件下,退化典型草原自然恢复演替进程。研究结果表明,物种多样性在典型草原群落自然恢复过程中呈波动状变化,最高值出现在第 6 年,为 3.3,随后又呈现下降趋势。丰富度和均匀度与物种多样性指数呈显著正相关,相关系数分别为 0.848 和 0.912。地上生物量和物种多样性二者之间没有明显的线性关系,其相关系数为 0.4813 ($P > 0.05$)。在演替的进程中,群落中主要植物种的优势地位发生了明显的替代变化。在恢复演替初期 C_4 植物对地表的覆盖和有机物的输入起关键作用,而 C_3 植物在后期对群落稳定起重要作用。1 年生植物在典型草原恢复初期起着非常重要的作用,可覆盖地表,防止水土流失,并为群落输入大量养分,为其他植物定居创造了稳定良好的土壤环境。

关键词:典型草原;恢复演替;生物多样性;植物群落

文章编号:1000-0933(2008)02-0855-07 中图分类号:Q145, Q16, Q948, S812 文献标识码:A

Dynamics of plant community during natural restoration and succession of the Inner Mongolia Steppe

SHAO Xin-Qing, WANG Kun*, WANG Yun-Wen, LIU Gui-He

Grassland Science Department, College of Animal Science and Technology, China Agricultural University, Beijing 100094, China

Acta Ecologica Sinica, 2008, 28(2): 0855 ~ 0861.

Abstract: A field experiment substitute a space series method for a time course method, was conducted in a degraded typical grassland in Balinyou County, Inner Mongolia. The objective of the experiment is to reveal the process of natural ecological restoration of grassland after removed human activities by fencing. The results indicated that species diversity dynamically changed during the process, with the highest value of 3.3 at the 6th year, and declined afterward. Both relationships between species richness and species diversity index and species uniformity and the later were significant ($p < 0.05$) with correlation coefficients of 0.848 and 0.912 respectively. Instead, the relationship between aboveground biomass and species diversity was not significant with correlation coefficient of 0.4813 ($P > 0.05$). Through restoration process, the prominent roles of some species in plant community alternatively changed significantly, that C_4 species played an important role at the early stage, but C_3 species occurred necessarily to stabilize the community at the late stage. Also, the annual species took an important role at early stage of the typical grassland restoration process, such as covering land surface, preventing soil erosion, recycling nutrients into community, and producing a better soil condition for other species' surviving.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(30500354);国家重点基础研究发展计划(973)资助项目(2007CB106805)

收稿日期:2007-03-29; **修订日期:**2007-11-07

作者简介:邵新庆(1969~),男,甘肃天水人,博士,主要从事草地生态恢复和草地管理研究. E-mail shaoxingqing@163.com

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail wangkun@cau.edu.cn

Foundation item: The project was financially supported by National Natural Science Foundation of China (No. 30500354) and National Basic Research (973) Program Project, China (No. 2007CB106805)

Received date:2007-03-29; **Accepted date:**2007-11-07

Biography: SHAO Xin-Qing, Ph. D., mainly engaged in regeneration of degraded grassland and grassland management. E-mail shaoxingqing@163.com

Key Words: typical grassland; restoration succession; biodiversity; plant community

生态系统退化是由于人为干扰或自然因素变化造成的生态系统结构简单化、功能衰退的过程^[1],其最终结果是土地退化、生物种类和数量减少^[2],生态系统自我维持的能量流动与养分循环部分中断^[3~5]。引起草原生态系统退化的人为干扰活动主要包括放牧、刈割、樵采和开垦等,其中,放牧家畜是影响最深且作用最广泛的因子^[6]。作为一种重要的人为干扰,放牧能直接改变草地的形态特征、草地生产力和群落结构^[7]。草原植物群落的特征与牧压强度密切相关,在大气候相对一致的区域内,牧压可以超越同地段其它环境因子而成为控制植物群落特征的主导因子^[8,9]。目前,巴林右旗仅有草原面积 85.8 万 hm^2 ,由于放牧超载 105%,其草地生产力下降,草群结构明显恶化^[10,11]。如何保护和恢复诸如巴林右旗等的退化典型草原,恢复其固有的结构和功能,已成为一项刻不容缓的任务。尽管对退化草地生态系统恢复的研究有许多报道^[12~14],但就国家启动禁牧围封等生态项目后,草地植被群落在去除干扰下,自然恢复的群落动态和恢复速率等方面研究较少。因此,本文以禁牧围封后自然演替的巴林右旗退化典型草原为研究对象,以空间代替时间的研究方法,探讨群落物种多样性、物种丰富度和生物量等生态恢复核心指标的动态变化,了解退化典型草原自然恢复演替过程中植被演替特征及自然恢复演替的规律和能力,为典型草原区的生态恢复建设和持续利用提供参考和理论依据。

1 研究方法

1.1 研究区自然概况

试验区域巴林右旗位于内蒙古自治区赤峰市北部,北纬 $43^{\circ}12' \sim 44^{\circ}27'$,东经 $118^{\circ}10' \sim 120^{\circ}05'$ 。温带季风型大陆性气候,年平均气温 4.9°C ,年日照 3000 ~ 3200h。年无霜期 121d,生长期 142d,平均年降水量 358mm。巴林右旗水分与热量在地区分布上很不协调, $\geq 0^{\circ}\text{C}$ 年积温南北相差 1000°C 之多。水分条件在年际间波动幅度较大(图 1)。巴林右旗地形复杂,有着复杂多样的土壤类型,主要有栗褐土、栗钙土和风沙土等。植被主要有大针茅(*Stipa grandis*)、羊草(*Leymus chinensis*)、茵陈蒿(*Artemisia capillaris*)、冷蒿(*Artemisia frigida*)、百里香(*Thymus serpyllum*)和达乌里胡枝子(*Lespedeza davurica*)等。

1.2 研究样地

巴林右旗自 1994 年起,依照草地生态恢复治理规划,对退化草地进行禁牧围封生态恢复。本研究以不同年度围封的草地为基础,选取了 5 个围封恢复的梯度:围封 10a(1994 年)的样地约为 14hm^2 ,位于巴林右旗大板镇翁根山前;围封 6a(1998 年)的样地面积约为 45hm^2 ,位于巴林右旗大板镇翁根山后;围封 4a(2000 年)的样地面积约为 22hm^2 ,位于巴林右旗麻斯塔拉;1、2a 的试验样地(2002 和 2003 年),围封面积分别约为 50hm^2 和 70hm^2 ,位于巴林右旗沙布台苏木。

1.3 群落调查

2003 年 9 月对巴林右旗退化草地植被群落状况和生态建设情况进行了调查。试验于 2004 年 6 月开始。在不同恢复年限的草地上随机设置样方,样方面积 $1\text{m} \times 1\text{m}$,每一恢复梯度草地设 15 个样方。对群落进行全面调查,调查不同自然恢复梯度的种类组成、植株密度、植被盖度、生物量和高度。并利用公式对群落的物种多样性的有关指数进行计算。将所记录的植物种分为两类功能型:(1)从光合碳同化途径和固氮角度,划分为 C_3 和 C_4 植物,以及豆科植物。(2)根据生活型分为 1 年生草本、多年生草本、多年生木本植物。

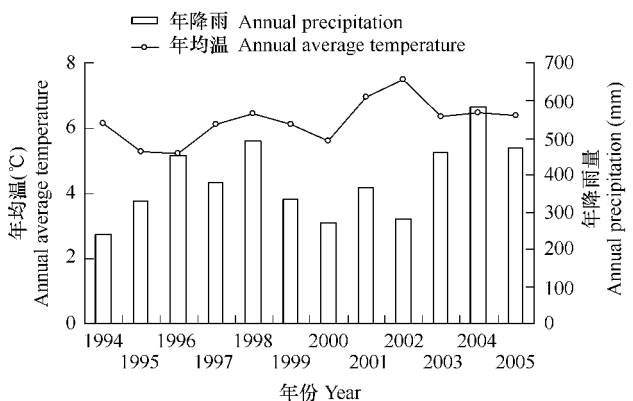


图 1 巴林右旗 1994 ~ 2005 年各年降雨量和年均温

Fig. 1 The annual precipitation and annual average temperature during 1994 ~ 2005 in Balinyou Banner

1.4 数据分析

物种优势度采用重要值来表示:重要值(W) = (相对密度 + 相对盖度 + 相对频度)/3

Shannon Wiener 指数:
$$H' = - \sum_{i=1}^s (P_i \ln P_i)$$

式中, P_i 为 n_i 个种的可能重要性,即 $P_i = n_i/N$; S 为种数; n_i 为第 i 种个体数。

Pielou 均匀度指数:
$$E1 = H'/\ln(s) = \ln(N1)/\ln(N0)$$

式中, E 为 Pielou 均匀性系数; H 为 Shannon 多样性系数; S 为种数; $\ln$ 为自然对数。

2 结果与分析

2.1 群落植物多样性变化

典型草原群落围封后,植物多样性在演替过程中不是直线上升的(图 2a),而是呈现“双峰型”。恢复初期,1、2a 生植物侵入,狗尾草(*Setaria Beauv*)等成为群落建群种,形成多样性指数的一个高峰,群落物种丰富度也相应增加(图 2b)。围封 4a 时,1 年生植物逐渐消失,群落以冷蒿、糙隐子草(*Cleistogenes squarros*)和达乌里胡枝子为主,并且冷蒿形成小规模集聚分布的格局。群落多样性出现一低峰。多样性指数为 2.84。到围封后第 6 年,冷蒿虽仍为优势种植物,但羊草、扁穗冰草(*Agropyron cristatum*)及大针茅等禾本科植物逐渐出现,群落处于演替的替代阶段,群落盖度较围封 4a 有明显的增加(图 2d),多样性指数达到最高,为 3.3。至围封 10a,羊草等禾本科植物的优势度逐渐增强,在群落中所占比例较大,这一阶段,群落较为稳定,但多样性指数平稳下降。群落在自然恢复演替过程中,均匀度指数与物种多样性指数有较一致的变化趋势(图 2c),物种分布均匀性指数呈波动上升的趋势。在围封第 6 年,群落均匀度指数达到最高,为 1.33。相关分析表明,植物物种多样性指数与物种丰富度和均匀度均呈显著正相关,相关系数分别为 0.848 和 0.912($P < 0.01$)。多样性指数与群落盖度有一定的相关性,但不明显。

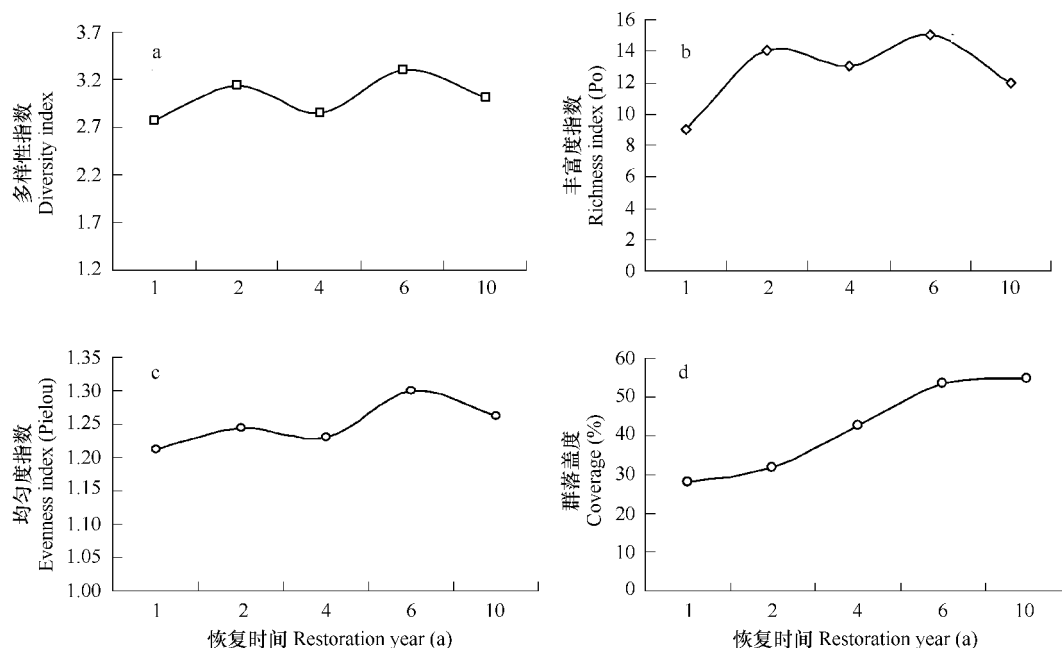


图2 围封后自然恢复过程中植物物种多样性(a)、丰富度指数(b)、均匀度(c)、和群落盖度(d)动态变化

Fig. 2 Dynamics of community species diversity (a), richness index (b), evenness index (c) and coverage (d) in different restoration stages

2.2 优势种的更替

优势种的更替是群落演替阶段的标志。围封初期群落优势种为星毛委陵菜和百里香等(表 1),围封第 2 年优势种为万年蒿(*Artemisia gmelinii*)、糙隐子草和苔草(*Carex Korshinsky*),但侵入的植物种类增多,侵入的主要植物是狗尾草等 1 年生植物。此阶段,群落物种丰富度随着围封时间的延续而逐渐增加,植被盖度也在

不断增加,群落结构正在发生缓慢变化。到围封第4年,1年生植物仍在群落里存在,但冷蒿种群已替代万年蒿种群,成为群落的优势种,小禾草糙隐子草和达乌里胡枝子在群落也占有相当大的比重,大针茅和羊草已经在群落中零星出现。随后演替则较为缓慢,到围封第6年,冷蒿仍为群落的优势种,但羊草和大针茅种群在群落中已占有相当大的比重。至围封第10年,才形成以大针茅、扁穗冰草和羊草等多年生禾本科植物为主的群落。可以看出,随着演替的进行,群落中主要植物种的优势地位发生了明显的替代变化。

表1 不同恢复时期群落优势种与其生物学特性和生活型

Table 1 The dominated species recorded in each succession stage, with the main life form

恢复年限 Restoration time(a)	植物种 Species	生活型* Growth forms	功能型 Functional type	重要值 Important value
1	星毛委陵菜 <i>Potentilla tanacetifolia</i>	P, G	C3	0.21
	百里香 <i>Thymus serpyllum</i>	P, S	C3	0.18
	狗尾草 <i>Setaria beauv</i>	A, G	C4	0.22
2	万年蒿 <i>Artemisia gmelinii</i>	P, S	C3	0.17
	糙隐子草 <i>Cleistogenes squarros</i>	P, G	C4	0.26
	苔草 <i>Carex korshinsky</i>	P, G	C4	0.20
	狗尾草 <i>Setaria beauv</i>	A, G	C4	0.15
4	冷蒿 <i>Artemisia frigida</i>	P, S	C3	0.26
	糙隐子草 <i>Cleistogenes squarros</i>	P, G	C4	0.11
	达乌里胡枝子 <i>Lespedeza davurica</i>	P, S	C3	0.11
6	冷蒿 <i>Artemisia frigid</i>	P, S	C3	0.15
	大针茅 <i>Stipa grandis</i>	P, G	C3	0.07
10	大针茅 <i>Stipa grandis</i>	P, G	C3	0.12
	扁穗冰草 <i>Agropyron cristatum</i>	P, G	C3	0.21
	羊草 <i>Leymus chinensis</i>	P, G	C3	0.26

* P: 多年生 perennial; A: 1年生 Annual; S: 灌木 Shrubs; G: 草本 Grasses

2.3 生活型演变

在植被的恢复演替中,群落生活型组成也相应发生变化(表1)。恢复早期阶段,一年生植物狗尾草迅速占据了群落的冗余空间,形成种群聚块的竞争优势,成为先锋植物层片。恢复中期阶段,多年生小灌木冷蒿、达乌里胡枝子和多年生小禾草糙隐子草相继出现,占据资源空间,形成优势种群。恢复后期,多年生禾本科牧草羊草等开始在群落中占据主要地位,它们对生态系统的稳定起关键作用。由植物碳同化途径划分的功能型来看, C₃和 C₄植物在整个恢复过程中都存在。 C₄植物随恢复演替进程而逐渐消失,而 C₃植物在恢复的各个阶段稳定性较好,且随演替的进展而呈现稳定增加的趋势。固 N 植物与非固 N 植物中,豆科植物在恢复的第2年开始出现,第4年后其物种数在群落中所占的比重较大。

2.4 地上生物量与群落指数的关系

典型草原群落在围封恢复演替过程中,地上生物量基本上呈逐渐增加的势态(图3),围封第2年生物量为 92.9g/m²,较封育恢复初生物量增加了 16.1g/m²。围封4a以后,群落地上生物量增加比较平缓,围封年际间增加最大不超过 10g/m²。但在恢复演替的2~4a间,生物量有最大的增幅,增加了约 27.4g/m²。

物种多样性指数的变化范围为 2.76~3.3 之间,相关分析表明,典型草原地上生物量随群落物种多样性的增加而有逐渐增加的趋势,但二者之间没有非常明显的线性关系($P > 0.05$),并且生物量与物种丰富度也不呈线性相关($P > 0.05$)。

3 讨论

生态恢复演替的研究最好采取长期的观测,但是长期的观测需要数十年或更长时间,在实际研究中有一定的难度。因此通常采用空间序列代替时间序列的方法^[15, 16],但应用这种研究方法时,要求试验样地的空间差异性较小,即温度和降雨的差异都小于 5%,在小区域范围内,不同地点的植被演替恢复效应才具有可比

性^[17, 18]。本研究充分考虑到空间因素的影响,选择的样地相邻,试验区域内的降雨、温度等基本一致。因此,空间因素对本研究结果影响较小。

诸多研究发现,物种多样性随演替时间的延长而升高,最高值常出现在演替的中期,随后又呈现下降的趋势^[19~21]。宝音陶格涛对冷蒿退化草原恢复研究表明,12a 围封改良过程中多样性指数表现为具有峰值的总体下降的趋势,其峰值发生在围封后的第 7 年,最大物种多样性出现于演替中后期^[22]。本研究结果与已有的结论基本一致,典型草原群落围封后进行自然恢复,其物种多样性动态符合植物群落演替过程中的多样性变化特征,最高值出现在恢复演替中后期,即围封 6a 后,多样性指数为 3.3。而后多样性指数呈平稳下

降的趋势,这是由于羊草等多年生禾本科牧草有较强的竞争扩展能力,占据群落主要地位,群落基本进入稳定期,新物种定居的几率较小,已有物种在时空上逐渐向稳定和合理分布的格局发展,表明此时典型草原群落已基本达到稳定状态。就生态恢复的时间进程来看,王国宏等认为黄土高原演替中期出现在撂荒自然恢复 46a 以后^[23];而阿拉善和浑善达克退化草地恢复演替的中期大约出现在围封后的 3~5a 内^[12, 24],其恢复中期时间明显缩短。本研究表明,典型草原群落恢复的中期应该在 6~7a 左右,这可能由于星毛委陵菜和冷蒿都是以不定根进行克隆生长,营养繁殖形成聚集的群体有利于提高个体的生存和竞争力,而且冷蒿在演替过程中常聚集形成斑块,限制了其它植物对土壤水分和养分的利用,延缓了典型草原恢复的进程。另外由于生态系统恢复中土壤恢复通常滞后于地上植被^[25],土壤养分缺乏也在一定程度上限制了群落的进展演替。

在典型草原群落恢复演替的初期阶段, C_4 植物对地表的覆盖和有机物的输入起关键作用^[26, 27],而 C_3 植物对恢复中后期群落的稳定意义较大。由于 C_4 植物具有较高的光合速率、高光饱和点、较低的 CO_2 补偿点、较高的水分和养分利用效率及抗逆性强等生物学特点,因而其生物产量和抵抗不良环境的能力等均高于 C_3 植物^[28~30],适应严酷环境的能力较强。而在自然条件较好的环境, C_3 植物通常在群落中占优势地位。此结果与内蒙古阿拉善和浑善达克草原的研究结论相一致^[12, 24]。豆科植物在恢复早期阶段出现,尽管数量较小,但能改善提高土壤养分,可为其它植物提供充足的氮素养分^[31]。可见,群落功能型多样性不仅影响群落的稳定性,而且对保持草原生产力长期稳定也有重要的作用。在典型草原恢复演替中植物生活型也发生相应变化,1 年生先锋植物在雨季来临时快速萌发、定居,之后在较短的时间内开花结实,完成生活史,这样可以避免地表高温和干旱等环境胁迫。而其枯死的植株,不但可以为群落输入养分,而且可阻止地表扬尘。因此,1 年生先锋植物在恢复早期对群落的恢复有较大的贡献和作用,为其他植物的定居创造了稳定的土壤环境。而到恢复后期,群落中物种数较多,总盖度增大,地表存有大量的凋落物,各种生活型植物种的丰富度基本呈稳定状态,此阶段多年生植物对群落的稳定性起重要作用。根据生活型及植物种随恢复演替的变化规律,典型草原群落自然演替过程的总体模式可以归纳为:星毛委陵菜 + 百里香 + 狗尾草群落 → 万年蒿 + 糙隐子草 + 狗尾草 + 苔草群落 → 冷蒿 + 糙隐子草 + 达乌里胡枝子群落 → 冷蒿 + 大针茅群落 → 大针茅 + 扁穗冰草 + 羊草群落。

长期以来,生产力与多样性之间的关系存在 2 种假设。Tilman 和 Naeem 等认为物种多样性与生产力之间呈正相关,特别是与地上生物量^[32, 33]。生态系统功能随着物种多样性增加而呈现出饱和型上升趋势。而 Kassen、杨利民和王长庭等认为群落的生产力为中等水平时其多样性最大,生产力和多样性间呈一种非线性关系,即多样性在低水平时随生产力的增加而增加,但最终在达到足够高的生产力时反而下降^[34~36]。本研究表明,典型草原群落在围封恢复演替过程中,多样性指数的变化范围在 2.76~3.3 之间,地上生物量随群落物种多样性的增加而有逐渐增加趋势,但二者之间没有非常明显的线性关系($P > 0.05$)。王国杰等对内蒙古主要草原群落功能群多样性与生产力关系的研究^[37, 38],以及宝音陶格涛等^[22]对锡林浩特草原的研究,都支持

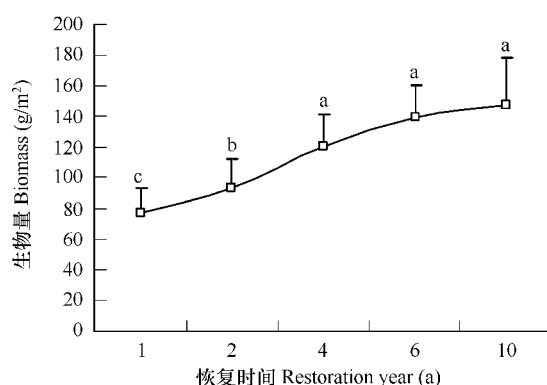


图3 不同封育恢复演替阶段的地上生物量

Fig. 3 The aboveground biomass of enclosed restoration stage

了本研究的结果,说明典型草原在自然恢复演替过程中,草原生产力受物种多样性影响不大。

References:

- [1] Zhang J N, Xu Q. The reason of ecological degradation. *Ecol. Science*, 1999, 18(3): 27—32.
- [2] Zhao G J, Liu Y H, Zhao M C. *Research on Environmental Integrated Control and Restoring Techniques*. Beijing: Beijing Science and Technology Press, 1993.
- [3] Davis G W, Richardson D M. *Mediterranean-type Ecosystems: the Function of Biodiversity*. Berlin: Springer-Verlag, 1995.
- [4] Davis W J. Focal species offer a management tool. *Science*, 1996, 271: 1362—1363.
- [5] Tilman D. Biodiversity: population versus ecosystem stability. *Ecology*, 1996, 77: 350—363.
- [6] Whittaker R H. Evolution of diversity in plant communities. *Ecology*, 1969, 50: 417—428.
- [7] Hobbs R L, Norton D A. Towards a conceptual framework for restoration ecology. *Restoration Ecology*, 1991, 4(2): 93—110.
- [8] Wang S P, Li Y H. Degradation mechanism of typical grassland in Inner Mongolia. *Chin. J. Appl. Ecol.*, 1999, 10(4): 437—441.
- [9] Li Y H. Restoration dynamics of degraded grasslands in the typical steppe zone of Inner Mongolia. *Chin. Biodiv.*, 1995, 3(3): 125—130.
- [10] Su Y L, Wang X L. Grassland status, problem and development strategy of Balinyou Banner. *Inner Mongolia Pratacult*, 2004, 16(4): 52—55.
- [11] Wang L J, Li Q F, Gen X. Effects of Banning Grazing on Grassland Productivity and Vegetation Composition in Balinyou Banner of Inner Mongolia. *Grass of China*, 2005, 27(5): 10—15.
- [12] Zhou Z Y, Fu H, Chen Y M. Changes of the species diversity and productivity of A-la-shan steppe area in restoration succession. *Acta Pratac Sin*, 2003, 12(1): 34—40.
- [13] Li B. The rangeland degradation in North China and its preventive strategy. *Scientia Agricultura Sinica*, 1997, 30(6): 1—9.
- [14] Bao Yin T, Liu M L. The study on biomass composition dynamics of community in degenerated steppe of *leymus chinensis* after shallow ploughing. *Journal of Natural Resources*, 2003, 18(5): 544—551.
- [15] Elgersma A M. Primary forest succession on poor sandy soils as related to site factors. *Biodiversity and Conservation*, 1998, 7: 193—206.
- [16] Karel P, Petr P. How do species dominating in succession differ from other? *Journal of Vegetation Science*, 1999, 10: 283—292.
- [17] Lieth H. Primary production: terrestrial ecosystem. *Journal of Human Ecology*, 1973, 1: 303—332.
- [18] Donnegan J A, Rebertus A J. Rates and mechanisms of subalpine forest succession along an environmental gradient. *Ecology*, 1996, 80: 1370—1384.
- [19] Gao X M, Huang J H, Wan S Q. Ecological studies on the plant community succession on the abandoned cropland in TaiBaiShan, Qinling Mountains. *Acta Ecologica Sinica*, 1997, 17(6): 619—625.
- [20] Yang R, Yu L F. A study on structure of primary stages community in restoration process of degraded Karst forest community in central GuiZhou. *GuiZhou Scienc*, 2004, 22(3): 44—48.
- [21] Wen Z M, Jiao F, Liu B Y. Natural vegetation restoration and soil nutrient dynamics of abandoned farmlands in forest-steppe zone on Loess Plateau. *Chin. J. Appl. Ecol.*, 2005, 16(11): 2025—2029.
- [22] Bao Yin T. The Studies of Changes of Plant Diversity on Degenerated Steppe in Enclosed Process. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis NeiMongol*, 1997, 28(1): 87—91.
- [23] Wang G H, Zhou G S, Yang L M, *et al.* Distribution, species diversity and life-form spectra of plant communities along an altitudinal gradient in the northern slopes of Qilianshan Mountains, Gansu, China. *Plant Ecology*, 2003, 165: 169—181.
- [24] Liu M Z, Jiang G M, Yu S L, *et al.* Dynamics of plant community traits during an 18-year natural restoration in the degraded sandy grassland of Hunshandak Sandland. *Acta Ecologica Sinica*, 2004, 24(8): 1734—1740.
- [25] Harris J A, Birch P, Palmer J. *Reclamation of Damaged Land for Nature Conservation*. HMSO: London, 1996.
- [26] Wang R Z. Photosynthetic pathways and life forms in different grassland types from North China. *Photosynthetica*, 2002, 40(2): 243—250.
- [27] Wang R Z. Photosynthetic pathway types of forage species along grazing gradient from the Songnen grassland, Northeastern China. *Photosynthetica*, 2002, 40(1): 57—61.
- [28] Yin L J, Wang P. Distribution of C₃ and C₄ photosynthetic pathways of plants on the steppe of Northeastern China. *Acta Ecologica Sinica*, 1997, 17(2): 113—122.
- [29] Yin L J, Li M R. A study on the geographic distribution and ecology of C₄ plants in China I. C₄ plant distribution in China and their relation with regional climatic condition. *Acta Ecologica Sinica*, 1997, 17(2): 350—363.
- [30] Keeley J E. C₄ photosynthetic modifications in the evolutionary transition from land to water in aquatic grasses. *Oecologia*, 1998, 116: 85—97.
- [31] Alvey S, Yang C H, Buerkert A, Crowley D E. Cereal/legume rotation effects on rhizosphere bacterial community structure in West African soils.

Bio. Fertil. Soils, 2003, 37: 73–82.

- [32] Tilman D, Knops J, Wedin D, *et al.* The influenced of functional diversity and composition on ecosystem processes. *Science*, 1997, 277: 1300–1302.
- [33] Naeem S, Tompson L J, Lawler S P, *et al.* Declining biodiversity can alter the performance of ecosystem. *Nature*, 1994, 368: 734–737.
- [34] Kassen R, Angus B, Graham B, *et al.* Diversity peaks at intermediate productivity in a laboratory microcosm. *Nature*, 2000, 406: 508–511.
- [35] Yang L M, Zhou G S, Li J D. Relationship between productivity and plant species diversity of grassland communities in Songnen Plain of northeast China. *Acta Phytocologica Sinica*, 2002, 26(5): 589–593.
- [36] Wang C T, Wang Q J, Long R J, *et al.* Changes in plant species diversity and productivity along an elevation gradient in an alpine meadow. *Acta Phytocologica Sinica*, 2004, 28(2): 240–245.
- [37] Wang G J, Wang S P, Hao Y B, *et al.* Effect of grazing on the plant functional group diversity and community biomass and their relationship along a precipitation gradient in Inner Mongolia Steppe. *Acta Ecologica Sinica*, 2005, 25(7): 1649–1656.
- [38] Wilsey B J, Potvin C. Biodiversity and ecosystem function: importance of species evenness in an old field. *Ecology*, 2000, 81: 887–892.

参考文献:

- [1] 章家恩, 徐琪. 生态退化的原因. *生态科学*, 1999, 18(3): 27–32.
- [2] 赵桂久, 刘燕华, 赵名茶. 环境整治和恢复技术. 北京: 北京科学技术出版社, 1993.
- [8] 汪诗平, 李永宏. 内蒙古典型草原退化机理的研究. *应用生态学报*, 1999, 10(4): 437–441.
- [9] 李永宏. 内蒙古典型草原地带退化草原的恢复动态. *生物多样性*, 1995, 3(3): 125–130.
- [10] 苏雅拉, 王霄龙. 巴林右旗草地资源生产力现状、存在问题及发展对策. *内蒙古草业*, 2004, 16(4): 52–55.
- [11] 王丽娟, 李青丰, 根晓. 禁牧对巴林右旗天然草地生产力及植被组成的影响. *中国草地*, 2005, 27(5): 10–15.
- [12] 周志宇, 付华, 陈亚明. 阿拉善荒漠草地恢复演替过程中物种多样性与生产力的变化. *草业学报*, 2003, 12(1): 34–40.
- [13] 李博. 中国北方草地退化及其防治对策. *中国农业科学*, 1997, 30(6): 1–9.
- [14] 宝音陶格涛, 刘美玲. 退化羊草草原在浅耕翻处理后植物群落生物量组成动态研究. *自然资源学报*, 2003, 18(5): 544–551.
- [19] 高贤明, 黄建辉, 万师强, 等. 秦岭太白山弃耕地植物群落演替的生态学研究 II. 演替系列的群落 α 多样性特征. *生态学报*, 1997, 17(6): 619–625.
- [20] 杨瑞, 喻理飞. 黔中退化喀斯特森林恢复过程中早期群落结构分析. *贵州科学*, 2004, 22(3): 44–48.
- [21] 温仲明, 焦峰, 刘宝元. 黄土高原森林草原区退耕地植被自然恢复与土壤养分变化. *应用生态学报*, 2005, 16(11): 2025–2029.
- [22] 宝音陶格涛. 退化草原封育改良过程中植物种的多样性变化的研究. *内蒙古大学学报(自然科学版)*, 1997, 28(1): 87–91.
- [24] 刘美珍, 蒋高明, 于顺利. 浑善达克退化沙地恢复演替 18 年中植物群落动态变化. *生态学报*, 2004, 24(8): 1734–1740.
- [28] 殷立娟, 王萍. 中国东北草原植物中 C_3 和 C_4 光合途径. *生态学报*, 1997, 17(2): 113–122.
- [29] 殷立娟, 李美荣. 中国 C_4 植物的地理分布与生态学研究. *生态学报*, 1997, 17(2): 350–363.
- [35] 杨利民, 周广胜, 李建东. 松嫩平原草地群落物种多样性与生产力关系的研究. *植物生态学报*, 2002, 26(5): 589–593.
- [36] 王长庭, 王启基, 龙瑞军. 高寒草甸群落植物多样性和初级生产力沿海拔梯度变化的研究. *植物生态学报*, 2004, 28(2): 240–245.
- [37] 王国杰, 汪诗平, 郝彦宾, 等. 水分梯度上放牧对内蒙古主要草原群落功能群多样性与生产力关系的影响. *生态学报*, 2005, 25(7): 1649–1656.