

DOI: 10.5846/stxb201306091536

李海燕, 杨允菲. 科尔沁草原区火电厂储灰池植被恢复过程中白草种群分蘖株的年龄结构. 生态学报, 2014, 34(20): 5907-5914.

Li H Y, Yang Y F. Age structure of *Pennisetum flaccidum* populations during vegetation restoration in coal ash storage pools of Coal Power Plant in the Kerqin grassland region. Acta Ecologica Sinica, 2014, 34(20): 5907-5914.

科尔沁草原区火电厂储灰池植被恢复过程中 白草种群分蘖株的年龄结构

李海燕, 杨允菲*

(东北师范大学草地科学研究所, 植被生态科学教育部重点实验室, 长春 130024)

摘要: 植被恢复过程中优势植物种群的年龄结构对于演替动态的预测具有重要的作用。通过对科尔沁草原区火电厂不同恢复年限储灰池植被恢复过程中白草种群分蘖株年龄结构、分蘖节芽年龄结构、分蘖株的物质生产力及营养繁殖力的比较研究, 分析了不同恢复年限(1 区: 1992—1993 年恢复; 2 区: 1996—1997 年恢复; 3 区: 1999—2000 年恢复) 和家畜干扰条件下(2005 年开始) 白草分蘖株结构的变化。结果表明: 2003 年围栏时, 随着恢复年限的增长, 3 个储灰池中白草分蘖株数量和生物量的龄级构成以增长型为主; 2007 年时, 两年不同程度的家畜干扰后, 3 个储灰池中白草分蘖株数量和生物量均为稳定型结构。2007 年各龄级白草分蘖节芽及其总量均显著高于 2003 年。2003 年围栏时, 3 个储灰池中白草分蘖株的物质生产力在同一龄级间均无显著差异; 2007 年家畜干扰后, 2 区和 3 区中 1a 分蘖株和总体均值的物质生产力均显著低于 2003 年。2003 年围栏时, 3 区中 1a 分蘖株和总体均值的营养繁殖力均显著高于 1 区和 2 区; 2007 年家畜干扰后, 3 区中 1a、3a 分蘖株和总体均值的营养繁殖力均显著低于 1 区和 2 区; 2007 年各龄级分蘖株及总体均值的营养繁殖力均高于 2003 年, 各恢复区 1a、1 区 2a 和各区分蘖株营养繁殖力的均值在两个取样年间的差异均达到显著水平。继续围栏保护对于本研究中火电厂储灰池的植被恢复是切实可行而有效的管理措施。

关键词: 生态恢复; 白草; 无性系植物; 分蘖株; 年龄结构

Age structure of *Pennisetum flaccidum* populations during vegetation restoration in coal ash storage pools of Coal Power Plant in the Kerqin grassland region

LI Haiyan, YANG Yunfei*

Key Laboratory of Vegetation Ecology, Ministry of Education, Institute of Grassland Science, Northeast Normal University, Changchun 130024, China

Abstract: Age structure of dominant plant populations is vital to forecast community dynamics during vegetation restoration. *Pennisetum flaccidum*, a perennial grass with long rhizomes, is widely distributed in the northeast and western regions as well as the Inner Mongolian Plateau of China. In the Kerqin grassland region, *P. flaccidum* is one of several native plant species that are used to restore coal ash storage pools generated by Coal Power Plants. In 2003, we located three ash storage pools (from here on referred to as 'plots') that differed in age (12, 8, and 5 years old) and contained *P. flaccidum*. We found that natural colonization had successfully restored these plots, with the average herbaceous cover for all three plots reaching 85%—90%. We sampled the *P. flaccidum* population. Due to relaxed oversight at the storage pools following a change in the managing entity in 2005, the plots were grazed by livestock. In 2007, we resampled the same plots and found that the total vegetation coverage had decreased to 30%—50%.

基金项目: 高等学校博士学科点专项科研基金项目(20110043110005); 国家自然科学基金项目(31170504, 30901049); 吉林省科技厅青年基金项目(20110112)

收稿日期: 2013-06-09; 修订日期: 2014-07-30

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: yangyf@nenu.edu.cn

In late August of 2003 and 2007, three to five replicate quadrats (each 0.25 x 0.25 m in area and 50 cm deep) in each plot were sampled by taking soil cores, including all aboveground shoots and belowground rhizomes, to maintain the inherent links among tillers and rhizomes. Age classes of tillers and tillering buds were classified according to vegetative propagation generations of tillering nodes and their numbers were counted. Age structure of tillers, tiller buds, tiller matter productivity and tiller vegetative propagation capability of *P. flaccidum* populations were studied during different vegetation restoration years in the coal ash storage plots of Coal Power Plant in the Kerqin grassland region. Structure changes of *P. flaccidum* tillers were analyzed under different restoration years (spot 1: 1992—1993; spot 2: 1996—1997; spot 3: 1999—2000) and livestock disturbance (the beginning of 2005). Number and biomass of *P. flaccidum* tillers showed expanding age structures in both spot 1 and spot 2 and it was stable in spot 3 in 2003. After two years livestock disturbed with different intensities since 2005, *P. flaccidum* tillers showed stable age structures in all three spots. Every age class and total tiller buds were significantly higher in 2007 after disturbing than those in 2003 as enclosed. Dry matter productivity of same age class tillers was not significantly different among three spots in 2003. Dry matter productivity of 1a tillers and average of each age class in spot 2 and spot 3 in 2007 were significantly fewer than those in 2003. Vegetative propagation capability of tillers of both 1a and average of all age classes were all higher in spot 3 than those in spot 1 and spot 2 in 2003 ($P < 0.05$). Vegetative propagation capability of tillers of 1a, 3a and average of all age classes in spot 3 were all significantly fewer than those in spot 1 and spot 2 in 2007 after livestock disturbance. Vegetative propagation capability of every age class tillers and their average value in 2007 was higher than those in 2003. There were significant differences between 2003 and 2007 at vegetative propagation capability of 1a age class tillers in every spot, 2a age class tillers in spot 1 and average vegetative propagation capability. Sustaining fence to coal ash storage pools of Coal Power Plant is an effective way to vegetation restoration in the arid Kerqin grassland region.

Key Words: ecological restoration; *Pennisetum flaccidum*; clonal plant; tiller; age structure

种群的所有个体均具有各自的年龄,植物种群的年龄结构是指种群内不同年龄级个体的数量分布。年龄结构是种群的重要属性之一,年龄结构的研究对深入分析种群动态和预测预报具有重要价值。目前,对于扰动环境植被恢复过程中植物种群构件特征的研究主要涉及植物种群构件的年龄结构和动态等^[1]。遭受各种自然的和人为的干扰后的群落,其中主要植物种的年龄构成即关乎当前种群的生存状态,也关乎植物种群的将来及群落的演替进程和方向^[2-5],亟需对恢复过程中主要优势植物种群构件的特征进行深入研究,以丰富恢复演替理论及对恢复的实践过程提供科学的参考。

煤灰渣是火电厂排出的废渣。大量煤灰渣的排放不仅破坏了原有的地表植被,也影响了周边地区的生态环境^[6]。因此,火电厂区域煤灰渣储放场的植被建植和恢复对于当地的生态环境保护具有重要的意义。最初的研究是为了防止扬尘产生的二次污染,在煤灰渣储放场上移栽或种植适宜的植物^[7-9],之后逐步扩展到对植物群落多样性的研究等^[10-11],

但对于定居后植被恢复过程中主要植物种群构件的年龄构成仅有少量的研究^[12-15]。

白草(*Pennisetum flaccidum*)为禾本科具横走长根茎的多年生无性系草本,作为优良牧草以及农田和苗圃常见杂草,广泛分布于内蒙古、东北等北部和西部各省区。对于白草的研究,始于利用白草的营养繁殖特征恢复弃耕地和对其群落生物量的初步研究等^[16-17],生理方面包括其对干旱胁迫的反应和适应及其光合特性研究等^[18-22],生态方面包括无性系的形态可塑性和生态特性的研究等^[23-24]。白草因其在内蒙古地区的广泛分布及快速生长和扩展的无性系特性,对于干扰后植被的快速恢复具有重要的作用。作为无性系植物,其种群的年龄结构特征直接反映种群的生长和扩展情况,以及植被恢复的程度。但是针对恢复过程中白草种群分蘖株年龄结构的研究至今未见报道。

随着植被恢复的进行,优势无性系植物种群构件的年龄结构的变化关乎种群自身的动态和恢复演替的进程。因此,本研究包括不同恢复年限下火

电厂储灰池植被恢复过程中:(1)白草种群分蘖株数量和生物量的年龄构成;(2)白草种群分蘖芽的年龄构成;(3)白草种群分蘖株的干物质生产力;(4)白草种群分蘖株的营养繁殖力。以分析和比较不同恢复年限下储灰池植被恢复过程中主要优势无性系植物种群分蘖株构件的年龄结构特征、物质生产特征和营养繁殖的策略,以丰富植物种群年龄结构研究并为该区域的恢复实践提供理论指导。

1 材料与方法

1.1 研究地区自然概况

本项研究在内蒙古科尔沁草原区内的通辽发电总厂煤灰渣储放场进行。通辽发电总厂位于通辽县双泡子镇四合屯种畜场境内。当地的年平均气温为 5.8℃,年积温为 2907℃,无霜期 142 d,年降水量为 376 mm,年蒸发量为 1 890 mm^[12]。

1.2 试验区概况

试验区为填满煤灰渣后表层覆盖沙土的储灰池区域。每个储灰池面积为 0.72 km² (900 m×800 m),深度为 5 m。3 个储灰池的覆土时间分别为:1 区 (spot 1) 1992—1993 年压土,2 区 (spot 2) 1996—1997 年压土,3 区 (spot 3) 1999—2000 年压土^[12]。覆盖的土壤为附近区域颗粒较粗的沙壤土,覆盖厚度约 30 cm,之后撒播沙打旺 (*Astragalus adsurgens*),并围栏禁止放牧利用,使其处于自然恢复状态。

2003 年 8 月中旬第 1 次取样时,3 个储灰池植被的恢复时间分别为 12、8a 和 5a。3 个储灰池恢复区的植被恢复良好,其盖度均在 85%—90% 以上;撒播的沙打旺与其他定居生长的多年生植物如白草、羊草 (*Leymus chinensis*) 和硬拂子茅 (*Calamagrostis rigidula*) 等以大小不等的小群落斑块分布于狗尾草等 1 年生植物群落中;其中,1 区和 2 区中个别地段不同大小的白草无性系斑块已相互连接成片,白草在各斑块中心均占优势地位。2007 年第 2 次取样时,3 个储灰池植被的恢复时间分别为 16、12a 和 9a。但由于 2005 年储灰池管理单位变更后管理的不严格,周围村庄的家畜对储灰池植被产生了不同程度的干扰,群落中多年生植物仍占据优势,但植被覆盖度已明显下降,仅为 30%—50% 之间。

1.3 取样方法

2003 年和 2007 年 8 月下旬,白草的果后营养

期,对 1 区、2 区和 3 区储灰池内的白草种群进行取样。样方面积为 0.25 m×0.25 m,深度为 0.50 m,3—5 次重复。取样时,将地上植株连同地下根茎部分一同挖出,并注意保持地上和地下部分之间的联系。室内处理样品,逐样方划分分蘖株和分蘖节的龄级^[25],分别计数各自的分蘖株数量和分蘖节数量,将各龄级分蘖株在 80℃ 烘至恒重后称重。

1.4 数据分析方法

数据分析采用 SPSS 软件进行。将各数据指标换算成 1 m×1 m 的常规单位面积指标,计算其平均值及标准误。用平均单株重作为衡量分蘖株生产力的指标,用平均单个分蘖株产生芽的数量作为衡量分蘖株营养繁殖力的指标。进一步采用单因素方程分析 (One-way ANOVA) 和独立样本 *T* 检验对不同恢复时间内各指标间的差异进行显著性检验 ($P < 0.05$)。

2 结果与分析

2.1 分蘖株的年龄结构

两次取样中不同恢复年限白草分蘖株数量的年龄结构如表 1。由表可知,2003 年首次取样时,恢复时间分别为 12a 和 8a 的 1 区和 2 区中白草分蘖株的数量均由 4 个龄级构成,1 区以 2a 占优势,呈稳定型年龄结构;2 区以 1a 占优势,呈增长型年龄结构;恢复时间为 5 年的 3 区仅由 2 个龄级构成,且为 1a 占优势的增长型结构。分蘖株的总数量随着恢复年限的延长由 3 区至 1 区逐渐增加,且 1 区和 3 区间的差异达到了显著水平。整体上,分蘖株生物量的龄级构成具有同分蘖株数量相似的结构特征 (表 2)。表明围栏状态下,随着恢复年限的增长,白草种群分蘖株的龄级构成逐渐趋于稳定。

至 2007 年第 2 次取样时,3 个恢复区的恢复时间分别已达 16、12a 和 8a。各恢复区中白草分蘖株的数量均由 3 个龄级构成,且均以 2a 占优势,均呈稳定型结构。各龄级分蘖株的数量和总数量则随着恢复年限的延长由 3 区至 1 区逐渐减少,且 1 区和 2 区同 3 区间的差异均达到了显著水平,呈现出同 2003 年相反的趋势。除 1 区外分蘖株生物量均具有与数量一致的龄级构成 (表 2)。同时,2007 年 2 区和 3 区中分蘖株的总数量均高于 2003 年,其中 3 区中两个取样年间的差别达到了显著水平。表明随着

白草生长年限的延长和家畜的干扰,其种群分蘖株的数量、生物量和龄级结构均发生了明显的变化。

表 1 不同恢复年限白草(*Pennisetum flaccidum*)分蘖株数量的年龄结构

Table 1 Age structure of *Pennisetum flaccidum* tiller number in different restoration years

取样年度 Sampling year	分区 Spot	恢复年限 RY/a	分蘖株年龄 Tiller age (株/m ² , M±SE)				合计 Total
			1 龄 1a	2 龄 2a	3 龄 3a	4 龄 4a	
2003	1 区	12	128.0±37.0 a	314.7 * ±5.3 a	181.3 * ±37.3a	21.3±10.7a	645.3±19.2 a
	2 区	8	311.2±38.5b	244.8 * ±30.9a	48.0±33.2 b	3.2±3.2 a	607.2±98.9ab
	3 区	5	218.7 * ±29.7ab	133.3 * ±14.1b	—	—	352.0 * ±33.3 b
2007	1 区	16	234.7±42.7 a	245.3±5.3 a	26.7±10.7 a	—	506.7±50.9 a
	2 区	12	234.7±23.2 a	458.7±35.0 b	48.0±24.4 a	—	741.3±45.6 a
	3 区	9	517.3±68.1 b	928.0±66.6 c	304.0±18.5 b	—	1749.3±120.6b

RY: 至取样时各储灰池的恢复年限 Restoration years until sampling; * 表示各龄级同一样地不同年间差异显著 ($P<0.05$); 各龄级同一年的不同小写字母表示不同样地间存在显著差异 ($P<0.05$)

表 2 不同恢复年限白草(*Pennisetum flaccidum*)分蘖株生物量的年龄结构

Table 2 Age structure of *Pennisetum flaccidum* tiller biomass in different restoration years

取样年度 Sampling year	分区 Spot	恢复年限 RY (Year)	分蘖株年龄 Tiller age (tillers/m ² , M±SE)				合计 Total
			1 龄 1a	2 龄 2a	3 龄 3a	4 龄 4a	
2003	1 区	12	66.2 * ±20.7 a	109.3±8.5 a	52.9±10.9 a	4.6±2.4 a	233.1±20.1 a
	2 区	8	141.7 * ±19.0 a	61.1±7.9 b	10.6±7.7 b	0.4±0.4 a	194.7 * ±24.2 a
	3 区	5	132.3±26.1 a	33.6 * ±7.0 b	—	—	165.9±33.1 a
2007	1 区	16	229.4±53.8 a	111.3±19.7 a	7.6±0.2 a	—	348.3±53.2 a
	2 区	12	58.9±8.0 b	70.4±7.0 a	4.7±3.5 a	—	134.0±10.8 b
	3 区	9	83.0±8.5 b	99.8±4.4 a	23.9±3.3 b	—	206.8±14.7 b

RY: 至取样时各储灰池的恢复年限 Restoration years until sampling; * 表示各龄级同一样地不同年间差异显著 ($P<0.05$); 各龄级同一年的不同小写字母表示不同样地间存在显著差异 ($P<0.05$)

2.2 分蘖节芽的年龄结构

对于多年生禾草,分蘖节为其多年生部位之一,对于植物的繁殖和更新具有重要的作用。2003 年围栏时,各恢复区中白草的分蘖节芽仅由 1—2 个龄级构成;2007 年家畜啃食干扰后,3 个恢复区中白草的分蘖节芽均由 3 个龄级构成,主要以 1a 或 2a 占优势,呈增长型或稳定型结构;分蘖节芽总数量则随着

恢复年限的延长由 3 区至 1 区逐渐减少,且 1 区同 3 区间的差异均达到了显著水平(表 3)。受到干扰后,2007 年 1 区至 3 区的分蘖节芽总量分别为 2003 年的 19.2 倍、29.8 倍和 19.1 倍,2007 年的各龄级分蘖节芽及其总量均显著高于 2003 年(表 3)。表明随着恢复年限的延长,除种群自身的生长作用外,家畜的啃食也促进了分蘖节芽的形成。

表 3 不同恢复年限白草(*Pennisetum flaccidum*)分蘖节芽的年龄结构

Table 3 Age structure of *Pennisetum flaccidum* tiller buds in different restoration years

取样年度 Sampling year	分区 Spot	恢复年限 RY (Year)	分蘖株年龄 Tiller age (tillers/m ² , M±SE)				合计 Total
			1 龄 1a	2 龄 2a	3 龄 3a	4 龄 4a	
2003	1 区	12	0	37.3 * ±5.3 a	21.3±10.7	0	58.7 * ±14.1 a
	2 区	8	44.8 * ±15.5 a	0	0	0	44.8 * ±15.5 a
	3 区	5	69.3 * ±10.7 a	26.7 * ±14.1 a	—	—	96.0 * ±24.4 a
2007	1 区	16	645.3±85.8 ab	426.7±83.8 a	53.3±10.7 a	—	1125.3±35.0 a
	2 区	12	528.0±51.4 a	773.3±138.7 a	32.0±9.2 a	—	1333.3±177.5 ab
	3 区	9	917.3±101.8 b	816.0±209.2 a	101.3±35.0 a	—	1834.7±198.2 b

RY: 至取样时各储灰池的恢复年限 Restoration years until sampling; * 表示各龄级同一样地不同年间差异显著 ($P<0.05$); 各龄级同一年的不同小写字母表示不同样地间存在显著差异 ($P<0.05$)

2.3 分蘖株的物质生产力

2003 年围栏时,3 个不同恢复年限储灰池中白草分蘖株的物质生产力在同一龄级间均无显著差异(图 1 A)。至 2007 年干扰后,1 区储灰池各龄级分蘖株的物质生产力显著高于其它 2 区(图 1 B)。2003 年 1 区中 1a 分蘖株和总体均值的物质生产力

均显著低于 2007 年($P<0.05$),而 2 区和 3 区中 1a 分蘖株和总体均值的物质生产力均显著高于 2007。表明在 2003 年围栏时各储灰池分蘖株的物质生产力较为稳定,而 2007 年时由于随恢复时间的延长种群自身的生长扩展和家畜的干扰因素其生产力而呈现不同的趋势。

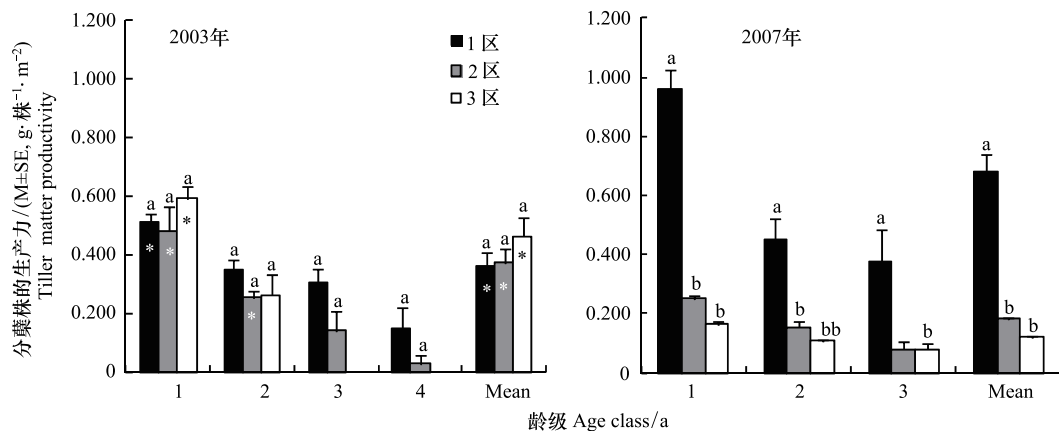


图 1 不同恢复年限白草(*Pennisetum flaccidum*)分蘖株的干物质生产力

Fig.1 Dry matter productivity of *Pennisetum flaccidum* tillers in different restoration years

* 各龄级同一样地不同年间差异显著 ($P<0.05$);同一年内各龄级的不同小写字母表示不同样地间存在显著的差异 ($P<0.05$)

2.4 分蘖株的营养繁殖力

分蘖株的营养繁殖力通过平均单个分蘖株分蘖节形成芽的数量来衡量。由表 4 可知,2003 年各储灰池围栏时,3 区中 1a 分蘖株和总体均值的营养繁殖力均显著高于 1 区和 2 区。表明定居时间较短的白草具有更为旺盛的营养繁殖力。2007 年各储灰池遭到家畜干扰后,3 区中 1a、3a 分蘖株和总体均值的

营养繁殖力均低于 1 区和 2 区,并达到了显著水平。通过对两个取样年的比较可知,2007 年各龄级及总体均值的营养繁殖力均高于 2003 年,2007 年各区的平均营养繁殖力为 2003 年的 24.5 倍、26.6 倍和 4.1 倍,且各恢复区 1a、1 区 2a 和各区均值的营养繁殖力在两个取样年间的差异均达到了显著水平。

表 4 不同恢复年限白草(*Pennisetum flaccidum*)分蘖株的营养繁殖力

Table 4 Vegetative propagation capability of *Pennisetum flaccidum* tillers in different restoration years

取样年度 Sampling year	分区 Spot	恢复年限 RY/a	分蘖株 Tiller age/(株/m ² , M±SE)				合计 Total
			1 龄 1a	2 龄 2a	3 龄 3a	4 龄 4a	
2003	1 区	12	0	0.118 ± 0.016 a	0.140 ± 0.083	0	0.092 ± 0.023 a
	2 区	8	0.129 ± 0.083 a	0	0	0	0.067 ± 0.044 a
	3 区	5	0.315 ± 0.010 b	0.195 ± 0.098 a	—	—	0.264 ± 0.049 b
2007	1 区	16	2.794 ± 0.131 a	1.729 ± 0.312 a	2.444 ± 0.801 a	—	2.256 ± 0.187 a
	2 区	12	2.254 ± 0.061 b	1.672 ± 0.225 a	0.833 ± 0.167 ab	—	1.784 ± 0.135 a
	3 区	9	1.795 ± 0.135 c	0.918 ± 0.287 a	0.339 ± 0.124 b	—	1.073 ± 0.178 b

RY: 至取样时各储灰池的恢复年限 Restoration years until sampling; * 表示各龄级同一样地不同年间差异显著 ($P<0.05$);各龄级同一年的不同小写字母表示不同样地间存在显著的差异 ($P<0.05$)

3 结论与讨论

种群动态的研究离不开种群的年龄结构。对于

高等植物种群,不同年龄组的比例对种群的繁殖能力和可能的发展前途起决定作用。在增长型种群中,幼年、中年的比例大,种群的适应能力强,当发生

自然灾害,或开发利用引起种群的年龄结构遭到破坏后,仍然可以自我恢复,回到原来的正常情况。但同样的情况若是发生在停滞和衰退的种群中,则很难自我恢复到原来的正常情况^[1]。已有的研究也表明,不同程度放牧和割草干扰使无性系植物羊草和根茎冰草的年龄结构发生改变^[2, 4, 26]。本研究中,2003 年时,仅恢复时间达 12a 时 1 区中白草分蘖株为稳定型年龄级结构,恢复时间分别为 8a 和 5a 的 2 区和 3 区均为增长型;遭受干扰后的 2007 年,3 个恢复区均为稳定型结构。可见,随着恢复年限的延长,白草种群分蘖株的年龄结构已趋于稳定,其原因可能是由于种群自身的生长、扩展和更新,还是家畜的干扰作用所导致,有待于进一步的研究。结合 2007 年取样时的植被盖度仅为 30%—50%,较 2003 年的 85% 已明显下降。可见,围栏封育将有利于储灰池植被的恢复,过度的干扰将使盖度减少而重新扬起灰尘,从而不利于植被的恢复和环境的保护。

本研究中,作为无性系禾本科植物重要的多年生部位的分蘖节^[2]在 2007 年 1 区至 3 区其各龄级分蘖节芽及总量均显著高于 2003 年,其总量分别约为 2003 年的 19—30 倍。可见,随着恢复年限的延长,除种群自身的生长作用外,家畜的啃食对分蘖节芽的形成起到了极大的促进作用。2003 年围栏时各储灰池分蘖株的物质生产力比较稳定,而 2007 年分蘖株物质生产力整体上呈减少趋势。随着恢复年限的延长,分蘖株的物质生产力应逐渐增加或趋于稳定^[27]。但因家畜的干扰,降低了地上分蘖株生物量和分蘖株的物质生产力。

放牧和割草干扰也可促进根茎冰草和羊草等根茎型无性系植物种群的营养繁殖力^[4, 28-30]。水淹、践踏、火烧等各种干扰方式对无性系植物构件的营养繁殖力则产生不同的影响^[5, 31-33]。一般情况下,随着恢复年限的延长,分蘖株的营养繁殖力应更趋于稳定。本研究中,各恢复区自 2005 年开始受到家畜啃食的干扰,至 2007 年取样时,3 个恢复区的总分蘖节芽数量为 2003 年的 19.1 倍—29.8 倍,且与 2003 年间的差异显著。在种群自身生长的同时,家畜干扰也极大的促进了分蘖节芽的产生,也使 2007 年与 2003 年间各恢复区分蘖株的平均营养繁殖力差异显著。对水淹干扰围栏后的研究也表明,羊草的营养繁殖力在不同龄级分蘖株间和水淹恢复时间

上都存在着差别^[33]。目前有很多草地恢复的研究认为,在恢复过程中适度的或间歇性的利用能有效抑制快速生长的物种,提高群落的物种多样性和群落的生态稳定性^[34]。此种观点适用于生境条件良好的草地,但是对于干旱区内火电厂储灰池这种特殊的生境,尤其应注意保护,以形成植物地被层,防止灰尘的再度升起。结合已有的对羊草、赖草和拂子茅等研究^[13-15],继续围栏保护对于本研究中火电厂储灰池的植被恢复是切实可行而有效的管理措施。

References:

- [1] Li H Y, Yang Y F. The mutual dynamics of clonal populations of two species: *Leymus chinensis* and *Carex duriuscula* in the process of restoration succession after the flooded meadow in the Songnen Plains of China. *Acta Prataculturae Sinica*, 2004, 13(6): 21-25.
- [2] Yang Y F, Liu G C, Zhang B T. An analysis of age structure and the strategy for asexual propagation of *Aneurolepidium chinense* population. *Acta Botanica Sinica*, 1995, 37(2): 147-153.
- [3] Yang Y F, Zheng H Y, Li J D. Comparison of age structures of the tillers in the *Leymus chinensis* population, a clonal grass species under different ecological conditions. *Acta Ecologica Sinica*, 1998, 18(3): 80-86.
- [4] Yang Y F, Zheng H Y, Li J D. The effects of grazing on age structure in clonal populations of *Agropyron michnoi*. *Acta Phytocologica Sinica*, 2001, 25(1): 71-75.
- [5] Li H Y, Yang Y F. Age structures of modules on *Leymus chinensis* clonal populations in the process of restoration succession after the flooded meadow in the Songnen Plains, China. *Acta Ecologica Sinica*, 2004, 24(10): 2171-2177.
- [6] Chen Q. Discussion on suppressing the floating ashes from ash yard of thermal power plants in southern Hebei. *Ash Comprehensive Utilization*, 2005, (5): 49-50.
- [7] Ren X J, Ma W X, Zhang Z M. Study on planting of *Coronilla buxifolia* in ash yard of thermal power plants. *Electric Power Environmental Protection*, 1989, (1): 37-41.
- [8] Mao C F, Li Z H. Adopt green "eco-forest" method to suppress the floating ashes in ash yard. *Hebei Electric Power*, 2002, 21(3): 3-4.
- [9] Guo Q, Li F. Benefit analyses of *Radixet Rhizonma* of final plant fence in ash yard of thermal power plants. *Modern Agriculture*, 2004, (9): 25-25.
- [10] Zhang H, Meng D P, Shangguan T L, Fan W B. Studies on the diversity of herbaceous vegetation in plain discharging coal dust field. *Journal of Shanxi University: Natural Science*, 1999, 22(3): 287-292.
- [11] Zhang H, Shangguan T L. Study of the plant community round

- discharging coal-dust field in Shentou second power plant. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2002, 22(5): 1109-1114.
- [12] Song X H, Yang Y F. Vegetative restoration and dynamic of the species in storage pools of coal ash in general firepower plant in Kerqin grassland region. *Journal of Sichuan Grassland*, 2003, (6): 11-14.
- [13] Yang Y F, Song X H. Age Structures of modular biomass of *Leymus secalinus* populations in the different stages of vegetative restoration on coal ash storing pools of thermal power plant, Kerqin steppe region. *Acta Agrestia Sinica*, 2005, 13(2): 130-133.
- [14] Yang Y F, Song X H. Age structure of population modules of *Leymus secalinus* in the process of the vegetative restoration in storage pools of coal ash in general firepower plant, Tongliao. *Acta Prataculturae Sinica*, 2005, 14(4): 116-118.
- [15] Ding X M, Yang Y F. Age structure of modules of *Calamagrostis pseudophragmites* populations in the process of vegetative restoration of the coal ash storage pools of general firepower in the Kerqin grassland region. *Acta Prataculturae Sinica*, 2007, 68(3): 15-20.
- [16] Li D Y. Double benefits of planting *Pennisetum flaccidum* on abandoned land. *Modern Agriculture*, 1987, (6): 10-10.
- [17] Zhu Z C, Jia D L. A preliminary study on the biomass of *Pennisetum flaccidum* community. *Pratacultural Science*, 1996, (5): 3-5.
- [18] Gao F X, Dan J B, Sun X W, Cao X M, Li D. Diurnal variations of photosynthesis and transpiration of *Pennisetum centrasaticum* Tzvel and their relationships with meteorological factors. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2010, 38(11): 5733-5735, 5873-5873.
- [19] Sun W, Wang D L, Wang L, Yang Y F. Response of transpiration characteristics and water use efficiency of *Pennisetum flaccidum* to the photosynthetic active radiation intensity and CO₂ concentrations. Beijing: Chinese Grassland Society, 2002.
- [20] Liu S, Gao Y B, Chen S P, Ren A Z, Liang Y, Liu N. A preliminary study on the clonal growth and adaptive strategy of *Pennisetum centrasaticum* and *Leymus secalinus*. *Journal of Desert Research*, 1999, 19(S1): 76-79.
- [21] Ren A Z, Gao Y B, Liang Y, Chen S P, Liu S, Liu N. Effect of drought stress on clonal growth of *Pennisetum centrasaticum* and *Leymus Secalinus*. *Journal of Desert Research*, 1999, 19(S1): 31-35.
- [22] Chen S P, Gao Y B, Ren A Z, Liang Y, Liu S, Liu N. Ecological adaptability of *Pennisetum centrasaticum* clones on farmland-sand dune ecotone of Keerqin sandy land. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2002, 13(1): 45-49.
- [23] Gao F X. The Investigation of Native Ground-Cover Plant and Research of Ecological and Biological Characteristics on *Pennisetum Centrasaticum* Tzvel [D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2008.
- [24] Ren A Z, Gao Y B, Wang J L. Morphological plasticity of *Pennisetum centrasaticum* clones in abandoned farmland in ecotone of farming and animal husbandry. *Journal of Desert Research*, 2000, 20(S1): 34-38.
- [25] Yang Y F, Zheng H Y, Li J D. Methods of study on age structure of clonal population in rhizome type grass. *Journal Northeast Normal University: Natural Science*, 1998, 30(1): 49-53.
- [26] Yang Y F, Lang H Q. A Study of population regulation of *Phragmites communis* as a clonal plant in different ecological conditions. *Acta Pratacultural Science*, 1998, (2): 2-10.
- [27] Li H Y, Yang Y F. Matter production and storage of *Leymus chinensis* clonal populations in restoration succession process of flooded meadow in Songnen Plain of China. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2005, 16(12): 2339-2343.
- [28] Tian X, Yang Y F. Structure of the clone populations of *Leymus chinensis* under different utilization conditions in the Xiliao River Plains. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2003, 14(3): 465-466.
- [29] Yang Y F, Li J D. Effects of different utilization methods on reproductive characters of *Aneurolepidium chinense*. *Grassland of China*, 1994, (5): 34-37.
- [30] Zhang C H, Yang Y F, Li J D. Studies on vegetative propagation of *Aneurolepidium chinense* populations in different interference conditions. *Pratacultural Science*, 1995, (6): 61-62, 67-67.
- [31] Li H Y, Yang Y F, Zhao Y. Bud banks of two dominant grass species and their roles in restoration succession series of a flooded meadow. *Polish Journal of Ecology*, 2012, 60(3): 535-543.
- [32] Dalgleish H J, Hartnett D C. The effects of fire frequency and grazing on tallgrass prairie productivity and plant composition are mediated through bud bank demography. *Plant Ecology*, 2009, 201(2): 411-420.
- [33] Latzel V, Mihulka S, Klimeov J. Plant traits and regeneration of urban plant communities after disturbance: does the bud bank play any role? *Applied Vegetation Science*, 2008, 11(3): 387-39.
- [34] Shang W Y, Wu G, Fu X, Liu Y. Maintaining mechanism of species diversity of land plant communities. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2005, 16(3): 573-578.

参考文献:

- [1] 李海燕, 杨允菲. 松嫩草甸水淹恢复演替过程中羊草和寸草苔无性系种群的相互动态. *草业学报*, 2004, 13(6): 21-25.
- [2] 杨允菲, 刘庚长, 张宝田. 羊草种群年龄结构及无性繁殖对策的分析. *植物学报*, 1995, 37(2): 147-153.
- [3] 杨允菲, 郑慧莹, 李建东. 不同生态条件下羊草无性系种群分蘖植株年龄结构的比较研究. *生态学报*, 1998, 18(3): 80-86.
- [4] 杨允菲, 郑慧莹, 李建东. 放牧干扰对根茎冰草无性系种群年龄结构的影响. *植物生态学报*, 2001, 25(1): 71-75.
- [5] 李海燕, 杨允菲. 松嫩平原水淹恢复演替过程中羊草无性系

- 种群构件的年龄结构. 生态学报, 2004, 24(10): 2171-2177.
- [6] 陈秋. 河北南部电网火电厂灰场扬尘治理探讨. 粉煤灰综合利用, 2005, (5): 49-50.
- [7] 任学杰, 马维祥, 张志敏. 电厂贮灰场纯灰上种植小冠花研究. 电力环境保护, 1989, (1): 37-41.
- [8] 毛春芳, 李振海. 采用绿色“生态林”法进行储灰场扬尘治理. 河北电力技术, 2002, 21(3): 3-4.
- [9] 郭强, 李芳. 麻黄在电厂贮灰场终期植物防护中效益浅析. 现代农业, 2004, (9): 25-25.
- [10] 张红, 孟东平, 上官铁梁, 范文标. 平原型灰场区植物多样性研究. 山西大学学报: 自然科学版, 1999, 22(3): 287-292.
- [11] 张红, 上官铁梁. 神头二电厂灰场植物群落分析研究. 西北植物学报, 2002, 22(5): 1109-1114.
- [12] 宋向华, 杨允菲. 科尔沁草原区火电厂储灰池植被恢复及其植物种类动态. 四川草原, 2003, (6): 11-14.
- [13] 杨允菲, 宋向华. 科尔沁草原区火电厂储灰池植被恢复阶段赖草种群生物量年龄结构. 草地学报, 2005, 13(2): 130-133.
- [14] 杨允菲, 宋向华. 通辽火电厂储灰池植被恢复过程中赖草种群构件的年龄结构. 草业学报, 2005, 14(4): 116-118.
- [15] 丁雪梅, 杨允菲. 科尔沁草原区通辽火电厂储灰池植被恢复过程中假苇拂子茅种群构件的年龄结构. 草业学报, 2007, 16(3): 15-20.
- [16] 李佃勇. 弃耕地种白草一举两得. 农业科学实验, 1987, (6): 10-10.
- [17] 朱志诚, 贾东林. 白草群落生物量初步研究. 草业科学, 1996, (5): 3-5.
- [18] 高飞翔, 谈建斌, 孙向伟, 曹晓蒙, 李德. 白草光合蒸腾日变化及其与气象因子的关系. 安徽农业科学, 2010, 38(11): 5733-5735, 5873-5873.
- [19] 孙伟, 王德利, 王立, 杨允菲. 白草 (*Pennisetum flaccidum*) 蒸腾特性与水分利用效率对有效光辐射强度和 CO₂ 浓度的响应 // 现代草业科学进展——中国国际草业发展大会暨中国草原学会第六届代表大会论文集. 北京: 中国草原学会, 2002.
- [20] 刘爽, 高玉葆, 陈世苹, 任安芝, 梁宇, 刘宁. 科尔沁沙地白草、赖草无性系生长及适应对策的初步研究. 中国沙漠, 1999, 19(S1): 76-79.
- [21] 任安芝, 高玉葆, 梁宇, 陈世苹, 刘爽, 刘宁. 白草和赖草无性系生长对干旱胁迫的反应. 中国沙漠, 1999, 19(S1): 31-35.
- [22] 陈世苹, 高玉葆, 任安芝, 梁宇, 刘爽, 刘宁. 科尔沁沙地农田-沙丘交错区白草无性系的生态适应性分析. 应用生态学报, 2002, 13(1): 45-49.
- [23] 高飞翔. 兰州本土地被植物调查与白草生态生物学特性研究 [D]. 兰州: 兰州大学, 2008.
- [24] 任安芝, 高玉葆, 王金龙. 农牧交错区弃耕地生境中白草无性系的形态可塑性研究. 中国沙漠, 2000, 20(S1): 34-38.
- [25] 杨允菲, 郑慧莹, 李建东. 根茎禾草无性系种群年龄结构的研究方法. 东北师大学报: 自然科学版, 1998, 30(1): 49-53.
- [26] 杨允菲, 郎惠卿. 不同生态条件下芦苇无性系种群调节分析. 草业学报, 1998, (2): 2-10.
- [27] 李海燕, 杨允菲. 松嫩草原水淹恢复演替过程中羊草无性系种群构件的物质生产与贮藏. 应用生态学报, 2005, 16(12): 2339-2343.
- [28] 田迅, 杨允菲. 西辽河平原不同利用条件下羊草无性系种群结构的研究. 应用生态学报, 2003, 14(3): 465-466.
- [29] 杨允菲, 李建东. 不同利用方式对羊草繁殖特性的影响及其草地更新的分析. 中国草地, 1994, (5): 34-37.
- [30] 张春华, 杨允菲, 李建东. 不同干扰条件下羊草种群营养繁殖的研究. 草业科学, 1995, (6): 61-62, 67-67.
- [34] 尚文艳, 吴钢, 付晓, 刘阳. 陆地植物群落物种多样性维持机制. 应用生态学报, 2005, 16(3): 573-578.