

内蒙古中东部草原不同生境克氏针茅(*Stipa krylovii* Roshev.) 种群的形态差异分析

贾美清 高玉葆* 刘海英 高 慧 吴建波 包晓影

(南开大学生命科学学院,天津 300071)

摘 要 对内蒙古中东部草原分布的克氏针茅进行了种群内和种群间的形态差异分析。结果表明 (1)种群内不同的形态性状存在不同程度的差异 (2)种群间生殖枝中的一部分形态性状以及营养枝高度和营养枝干重均存在较大差异 (3)每穗小花数、每穗籽粒数、每穗小穗数、生殖枝高、穗干重、生殖枝干重、每穗种子重、种子重/生殖枝重比等性状的变化趋势相同,均表现为随生境条件变差而增加,即在生殖上投入增加以增大适合度 (4)主成分分析表明穗长、种子重/生殖枝重比、每穗小花数、每穗籽粒数、生殖枝高、基盘长、第二芒柱长、营养枝高、千粒重、芒针长是不同种群差异的主要指标。这些形态性状的差异可以看作克氏针茅对不同生境的适应性表现。

关键词 克氏针茅 形态差异 主成分分析

中图分类号 Q949 **文献标志码** A **文章编号** 1673-5102(2008)05-0608-06

Morphological Variations of *Stipa krylovii* Roshev. in Middle and Eastern Inner Mongolia Steppe

JIA Mei-Qing GAO Yu-Bao* LIU Hai-Ying GAO Hui WU Jian-Bo BAO Xiao-Ying

(College of Life Science, Nankai University, Tianjin 300071)

Abstract In this paper four populations of *Stipa krylovii* in Inner Mongolia steppe, collected from Xinhot, West Xilinhot, East Xilinhot, Bayanwula, respectively, were used for the study of their morphological variations. (1) The variation of some morphological characters was greater than that of other characters within the same population. (2) Among all populations some of the reproductive traits varied much more than others, and in the vegetative traits, dry matter weight per reproductive shoot had greater variation than height of vegetative shoot. (3) Most reproductive traits, including the number of florets per panicle, seeds per panicle, spikelets per panicle, height of reproductive shoot, dry matter weight per panicle, dry matter weight per reproductive shoot, seed weight per panicle and the ratio of seed weight/reproductive shoot weight varied in a similar pattern, and their values increased with their habitats worsening. This suggested that *S. krylovii* could increase the allocation of the photosynthetic assimilate to sexual reproduction so as to respond to the adverse habitat. (4) The principal component analysis revealed that ten morphological traits were mainly responsible for the variations among populations. The ten traits included the length of panicle, ratio of the dry matter weight between seeds and reproductive shoot, the number of spikelets per panicle, the number of seeds per panicle, height of the reproductive shoot, height of vegetative shoot, weight of 1 000 seeds, length of awn apex, length of callus and length

基金项目:国家重点基础研究发展规划项目(2007CB106802)

第一作者简介:贾美清(1978—),女,硕士,主要从事种群生态学研究。

* 通讯作者 E-mail: ybgao@nankai.edu.cn

收稿日期 2008-02-26

of the second segment of awn. The variation of these traits might have resulted from adaptability of *S. krylovii* to different habitats.

Key words *Stipa krylovii* Roshev. ;morphological variation ;principal component analysis

内蒙古克氏针茅(*Stipa krylovii* Roshev.)草原是亚洲中部草原区所特有的中温型草原类型之一。在大针茅草原分布区内由于过牧而造成的退化演替地段,克氏针茅可成为优势成分,在荒漠草原区虽有渗入但不形成优势。克氏针茅是良好的饲用植物,具有耐干旱、耐践踏的特点,是一种非常重要的草场资源,多年来一直是研究的重点对象,已经有大量的报道,这些报道主要集中在地理分布^[1]、放牧管理^[2-3]、种子和种子库^[4-5]、生长与繁殖^[6-8]、遗传分化^[9-11]、光合^[12]以及抗旱性^[13-15]等方面。对不同地理种群克氏针茅形态差异方面的研究并不多,只涉及到颖果直径等少数形态特征^[16-18],而且分析尚不够深入。通过遗传分析的手段研究克氏针茅遗传变异的结果显示克氏针茅存在广泛的遗传变异。植物的性状不仅受遗传控制,也受环境的影响^[19-21]。在不同的生境中,植物会在形态结构、生长发育以及生活史方面等形成各自的适应特征。这些适应特征,尤其是与繁殖对策

和适合度相关的适应特征对于植物繁衍后代、延续和扩大种群起着重要作用。本文通过对分布于内蒙古锡林郭勒盟典型草原东部、中部和西部4个克氏针茅种群的22个形态性状的测定和分析,从种群水平定量分析长期处于不同生境中的克氏针茅在形态及生殖策略方面以何种变化方式来适应环境,为克氏针茅草原的科学管理和保护措施制定提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 样地的选取

2006年9月上旬,在内蒙古锡林郭勒盟从东到西选取4个样地。样地的设置以体现水分梯度、无人干扰为原则。4个种群从西到东依次分布于阿巴嘎旗新浩特东部(新浩特种群)、锡林浩特市西部(锡林浩特西种群)、锡林浩特市东部(锡林浩特东种群)以及西乌珠穆沁旗巴彥乌拉东北部(巴彥乌拉种群)。各样地的位置及生境特点见表1。

表1 种群的位置及生境特点
Table 1 Location and habitat characters of four populations

种群名称 Population name	新浩特种群 Xinhot	锡林浩特西种群 West Xilinhot	锡林浩特东种群 East Xilinhot	巴彥乌拉种群 Bayanwula
植物群落特征 Character of plant community	克氏针茅—羊草草原,地表裸露较为严重	克氏针茅—羊草草原,主要伴生种为冷蒿和大针茅	大针茅—羊草草原,在缓坡顶部有克氏针茅分布	主体部分为大针茅—羊草草原,在缓坡中上部有克氏针茅分布
位置 Location	阿巴嘎旗东 15 km	锡林浩特市西 45 km	锡林浩特市东 27 km	巴彥乌拉(西乌珠穆沁旗)东北 12 km
土壤类型 Soil type	淡栗钙土	栗钙土	栗钙土	暗栗钙土
地理坐标 Geographic position	44.12°N, 114.98°E	43.93°N, 115.74°E	44.14°N, 116.36°E	44.64°N, 117.72°E
海拔 Altitude(m)	1 160	1 088	1 121	1 152
年平均降水量 Annual precipitation (mm)	230	290	300	340
≥10℃ 积温 ≥10℃ Cumulative temperature in a year(°C)	2 552	2 496	2 400	2 256
土壤全氮 Total nitrogen(g · kg ⁻¹)	1.28	1.67	1.8	3.99
土壤全磷 Total phosphorus(g · kg ⁻¹)	0.11	0.15	0.33	0.17
土壤有机质 Organic matter(g · kg ⁻¹)	19.17	24.3	30.52	54.57

1.2 实验方法

1.2.1 形态特征指标的测量

在果实成熟期内,每个样地内随机选取50个株丛,每一株丛分别选取生殖枝和营养枝各一个,齐地面剪下,标记并带回实验室风干。测量生殖枝

的高度、穗长、每穗小穗数、每穗小花数、每穗种子数,同时测量营养枝的高度。将样品在80℃烘干至恒重,分别测定每个标记样品的干重、生殖枝的穗干重、每穗种子重和千粒重。从每穗随机选取两个完整的小花(包含颖果),测量基盘长、芒针长、第

表 2 种群 20 个形态指标的平均值、标准差和变异系数

Table 2 The mean values of standard deviation(SD) and coefficients of variation(CV%) of twenty morphological characters within populations										
形态指标 Character	新浩特种群 Xinhot		锡林浩特西种群 West Xilinhot		锡林浩特东种群 East Xilinhot		巴彦乌拉种群 Bayanwula		平均值 Mean value	
	Mean ± SD	CV%	Mean ± SD	CV%	Mean ± SD	CV%	Mean ± SD	CV%	Mean ± SD	CV%
每穗小花数(个) The number of florets per panicle	41.81 ^a ± 11.66	27.89	35.06 ^b ± 9.19	26.21	30.47 ^b ± 8.58	28.17	15.68 ^c ± 5.34	34.05	30.61 ± 13.1	42.81
每穗籽粒数(个) The number of seeds per panicle	34.74 ^a ± 10.98	31.59	28.86 ^b ± 8.11	28.10	24.17 ^c ± 8.53	35.28	12.00 ^d ± 3.80	31.68	24.83 ± 11.1	47.15
每穗小穗数(个) The number of spikelets per panicle	6.53 ^a ± 0.83	12.71	5.94 ^b ± 0.68	11.37	5.49 ^c ± 0.62	11.31	5.30 ^c ± 0.81	15.37	5.81 ± 0.87	15.03
基盘长 Length of the callus(cm)	0.25 ^{ab} ± 0.037	14.79	0.26 ^{ab} ± 0.033	12.74	0.25 ^b ± 0.033	13.17	0.26 ^a ± 0.036	13.72	0.26 ± 0.04	13.76
芒针长 Length of the awn apex(cm)	11.67 ^a ± 1.60	13.67	11.39 ^{ab} ± 1.48	12.98	10.94 ^b ± 1.22	11.15	10.90 ^b ± 1.18	10.84	11.21 ± 1.40	12.51
第一芒柱长 Length of the first segment of awn(cm)	3.14 ^b ± 0.46	14.52	3.21 ^b ± 0.51	15.87	3.41 ^a ± 0.50	14.73	3.40 ^a ± 0.56	16.42	3.29 ± 0.53	16.23
第二芒柱长 Length of the second segment of awn(cm)	1.39 ^a ± 0.20	14.69	1.35 ^a ± 0.21	15.34	1.19 ^c ± 0.16	13.46	1.28 ^b ± 0.16	12.65	1.32 ± 0.19	14.40
外稃长 Length of the lemma(cm)	0.81 ^b ± 0.047	5.79	0.84 ^a ± 0.049	5.89	0.81 ^b ± 0.048	5.97	0.81 ^b ± 0.046	5.80	0.82 ± 0.05	5.98
内稃长 Length of the inner bract(cm)	0.75 ^{ab} ± 0.051	6.75	0.76 ^a ± 0.047	6.11	0.75 ^a ± 0.042	5.62	0.73 ^b ± 0.041	5.62	0.75 ± 0.05	6.23
外颖长 Length of the outer glume(cm)	2.88 ^a ± 0.24	8.36	2.83 ^a ± 0.34	11.86	2.70 ^b ± 0.23	8.63	2.58 ^c ± 0.22	8.63	2.72 ± 0.29	10.80
内颖长 Length of the inner glume(cm)	2.69 ^a ± 0.23	8.45	2.69 ^a ± 0.31	11.70	2.56 ^b ± 0.23	8.91	2.40 ^c ± 0.18	7.70	2.54 ± 0.27	10.79
种子长 Length of seed(cm)	1.06 ^b ± 0.056	5.28	1.09 ^a ± 0.06	5.68	1.06 ^b ± 0.056	5.33	1.06 ^b ± 0.005	4.99	1.07 ± 0.06	5.39
生殖枝高 Height of reproductive shoo(cm)	45.93 ^a ± 7.85	17.1	44.02 ^{ab} ± 9.02	0.49	41.12 ^b ± 9.31	22.66	35.32 ^c ± 6.13	17.35	41.55 ± 9.05	21.79
营养枝高 Height of vegetative shoo(cm)	21.45 ^a ± 5.76	6.86	21.72 ^a ± 3.47	15.97	24.08 ^a ± 5.53	22.98	22.82 ^a ± 6.38	27.97	22.51 ± 5.44	24.17
穗干重 Dry matter weight per panicle(g)	0.25 ^a ± 0.067	27.31	0.19 ^b ± 0.065	34.62	0.14 ^c ± 0.042	1.05	0.083 ^d ± 0.031	37.55	0.16 ± 0.08	49.01
穗长 Length of panicle(cm)	20.18 ^a ± 3.27	16.19	17.00 ^b ± 3.04	17.89	18.90 ^a ± 4.06	1.51	15.13 ^c ± 3.10	20.47	17.81 ± 3.87	21.76
生殖枝干重 Dry matter weight per reproductive shoo(g)	0.29 ^a ± 0.109	37.14	0.32 ^a ± 0.11	34.53	0.20 ^b ± 0.07	34.85	0.14 ^c ± 0.057	39.69	0.24 ± 0.11	47.13
每穗种子重 Weight of seeds per panicle(g)	0.097 ^a ± 0.03	31.41	0.072 ^b ± 0.028	38.36	0.050 ^c ± 0.017	34	0.022 ^d ± 0.011	51.50	0.06 ± 0.04	58.70
营养枝干重 Dry matter weight per vegetative shoo(g)	0.046 ^a ± 0.021	46.70	0.049 ^a ± 0.019	39.02	0.035 ^b ± 0.02	57.14	0.031 ^b ± 0.020	64.75	0.04 ± 0.02	51.59
千粒重 Weight of 1 000 seeds(g)	4.0 ^a ± 0.0067	1.67	3.6 ^b ± 0.0095	2.61	2.7 ^d ± 0.0097	3.53	3.1 ^c ± 0.0095	3.09	3.4 ± 0.05	14.92
穗重/生殖枝重比 Ratio of the weight between panicle and reproductive shoot	0.47 ^a ± 0.079	17.03	0.37 ^{cd} ± 0.055	14.77	0.41 ^b ± 0.056	13.89	0.37 ^d ± 0.061	16.70	0.40 ± 0.07	18.61
种子重/生殖枝重比 Ratio of the weight between seeds per panicle and reproductive shoot	0.18 ^a ± 0.046	25.45	0.14 ^c ± 0.032	22.15	0.15 ^{bc} ± 0.041	27.72	0.10 ^d ± 0.042	42.20	0.14 ± 0.049	34.43

注 相同字母表示在 0.05 水平上不显著
Note Means with the same letter are not significantly different at 5% level

一芒柱长、第二芒柱长、种子长、外颖长、内颖长 ,并同时测量外稃长、内稃长。小花上各指标的测量 100 次重复 ,千粒重 6 次重复 ,其它各指标的测量均为 50 次重复。

1.2.2 样地土壤分析

2006 年 8 月 1 ~ 15 日 ,对各样地的土壤进行随机取样。各样地分别取 0 ~ 10、10 ~ 20、20 ~ 30 cm 三层的土壤样品 ,设 10 次重复 ,测定土壤有机质、全氮和全磷。土壤有机质测定采用重铬酸钾容量法—外加热法 ,土壤全氮的测定采用半微量凯氏定氮法 ,土壤全磷的测定采用 HClO₄—H₂SO₄ 法^[22]。

1.3 数据分析

利用 SPSS 和 Excel 对获得的数据进行统计分析^[23]。在 SPSS13. 0 软件上用单因素方差分析 (ANOVA)中的 LSD 比较种群之间各形态指标的变异大小。用主成分分析将 22 个形态学指标进行分类 ,找出影响克氏针茅种群间形态差异的主要形态指标。

2 结果与分析

2.1 种群内及种群间的形态变异

同一种群的不同形态特征变化程度不同(表 2)。营养枝干重的变异在各种群中都是最大的。在新浩特种群和巴彦乌拉种群中千粒重的变异最小 ,变异系数分别为 1. 67% 和 3. 09% ,在锡林浩特西种群中 ,生殖枝高的变异系数最小(变异系数为 0. 49%) ,在锡林浩特东种群中 ,穗干重变异系数最小(变异系数为 1. 05%)。

种群间的变异系数变化较大 ,变异系数的变化幅度为 5. 39%(种子长) ~ 58. 7%(每穗种子重)。种群间生殖枝中的一部分形态性状变异比较大 ,与种子长度和小花长度相关的形态形状变异相对较小 ,即每穗种子重、穗干重、每穗籽粒数、生殖枝干重、每穗小花数、种子重/生殖枝重比变异系数较大 ,种子长、外稃长、内稃长、外颖长、内颖长变异系数较小。种群间营养枝部分的变异较大 ,营养枝干重的变异(变异系数 51. 59%)大于营养枝高度的变异(变异系数 24. 17%)。

4 个种群大部分性状的变化表现出一定的趋势 :每穗小花数、每穗籽粒数、每穗小穗数、生殖枝高、穗重、生殖枝干重、每穗种子重、种子重/生殖枝重比等性状的变化趋势相同且变异系数较大 ,即由典型草原东部到典型草原西部 ,这些与有性生殖有关的各性状的平均值逐渐增大(表 2) ,营养枝干重

表 3 22 个形态特征的贡献率及主分量值
Table 3 The principal components and contribution value of 22 morphological characters

性状特征向量 Eigenvector	主成分 1 Principle component 1	主成分 2 Principle component 2	主成分 3 Principle component 3
穗干重 Dry matter weight per panicle	0. 78	0. 606	0. 159
穗长 Length of panicle	0. 975	0. 104	-0. 195
生殖枝干重 Dry matter weight per reproductive shoot	0. 586	0. 532	0. 611
种子重 Weight of seeds per panicle	0. 794	0. 579	0. 185
营养枝干重 Dry matter weight per vegetative shoot	0. 514	0. 615	0. 598
每穗小花数 The number of florets per panicle	0. 885	0. 395	0. 247
每穗籽粒数 The number of seeds per panicle	0. 868	0. 428	0. 251
每穗小穗数 The number of spikelets per panicle	0. 67	0. 741	0. 043
基盘长 Length of callus	-0. 855	0. 19	0. 483
芒针长 Length of awn apex	0. 566	0. 807	0. 168
第一芒柱长 Length of the first segment of awn	-0. 479	-0. 841	-0. 252
第二芒柱长 Length of the second segment of awn	0. 116	0. 98	0. 16
外稃长 Length of lemma	-0. 077	0. 219	0. 973
内稃长 Length of inner bract	0. 693	0. 087	0. 716
外颖长 Length of outer glume	0. 749	0. 562	0. 352
内颖长 Length of inner glume	0. 762	0. 426	0. 487
种子长 Length of seed	-0. 077	0. 219	0. 973
生殖枝高 Height of reproductive shoot	0. 843	0. 424	0. 33
营养枝高 Height of vegetative shoot	-0. 074	-0. 967	-0. 245
千粒重 Weight of 1 000 seeds	0. 273	0. 956	0. 108
种子重/生殖枝重比 Ratio of the weight between seeds per panicle and reproductive shoot	0. 906	0. 277	-0. 038
穗重/生殖枝重比 Ratio of the weight between panicle and reproductive shoot	0. 781	0. 342	-0. 523
累积贡献率 Cumulative contribution rate	70. 70%	90. 28%	100%

和营养枝高也表现出与生殖枝各性状相同的变化趋势 ,基盘长的变异表现出与生殖部分各性状相反的变化趋势 ,即典型草原东部到典型草原西部逐渐减小 ,在优越的生境条件下基盘长较长 ,外稃长、内

稃长、外颖长、内颖长、种子长这些性状的平均变异系数较小,相对稳定。

2.2 主成分分析

为了确定形态特征对 4 个种群变异的影响程度,对克氏针茅 4 个种群的 22 个形态指标进行主成分分析。分析表明,第一主成分贡献率 70.70%,前两个主成分的累积贡献率达 90.28%。它们包含的信息量已达到统计学的要求,应该以前 2 个主成分为主进行分析。在第一主成分中穗长、种子重/生殖枝比重负荷较大,都大于 90% 以上,其中外颖长的负荷最大(0.975),每穗小花数、每穗籽粒数、生殖枝高、基盘长的负荷也比较大达到 80% 以上。在第一主成分中这 6 个形态指标是造成各种群形态差异的主要的形态指标。第二主成分中第二芒柱长、营养枝高、千粒重的负荷较大,达到 90% 以上,芒针长负荷达到 80% 以上,贡献比较大,对种群变异也有重要作用。

3 讨论

(1) 形态性状既具有变异性又具有稳定性,受其本身遗传组成和所处生态环境两方面的影响^[24]。研究认为尽管形态变异具有一定的遗传基础,但是物种改变环境的能力,即环境压力在导致形态变异中也起着重要的作用^[17]。植物很难处于生长发育最适的环境条件,尤其是对于不同的个体而言,无论是随着气候的变化,还是随着生长发育进程的群落条件,总是要产生或大或小的差异^[25]。本文多重比较(表 2)的结果表明不同生境克氏针茅 22 个形态特征在种群内和种群间都存在显著的变异,各形态特征种群内及种群间的变异程度不同,每穗小花数、每穗籽粒数、每穗小穗数、生殖枝高、穗重、生殖枝干重、每穗种子重等性状在各种群间存在显著的变异,说明这些性状容易受环境的影响,可塑性较大;外稃长、内稃长、外颖长、内颖长、种子长这些性状在种群间变异较小,相对稳定。

(2) 植物对于环境的生存适应主要表现在增大适合度,不断繁衍生存下去,最大限度地适应环境。多年生植物和克隆植物能够调节生活史策略以适应不利的生长环境^[26~28]。植物总资源的生殖投入是讨论植物生活史的重要参数^[29]。研究认为来源于荒芜、开阔生境中的植物在生殖投入方面有较高可塑性,而且植物中生殖投入的可塑性具有适应性意义,尤其对于生活在波动的、不可预测环境中的植物^[30,31]。本文统计分析表明种群间生殖部

分的变异较大,每穗小花数、每穗穗粒数、每穗小穗数、生殖枝高、穗重、生殖枝干重、每穗种子重、种子重/生殖枝重比等性状的变化趋势在各种群间相同,即典型草原西部种群在生殖方面的投入最高,典型草原中部种群在生殖方面的投入次之,典型草原东部种群在生殖方面的投入最低。这种趋势反映出,随着生境变差,克氏针茅种群生殖投入增多,体现了以增大适合度应对多变环境的适应性特点。

Grime 根据植物的生活史和栖息地将植物的适应对策分为三类,即竞争型对策、耐受型对策和杂草型对策;当栖息地资源丰富、干扰稀少时能建立拥挤的植物种群,有利于形成竞争型对策,它与 K-对策相当;当资源丰富、条件不严酷、但干扰频繁,则易形成杂草型对策,它与 r-对策相当;当资源稀少、条件严酷(指营养贫乏、光照和气候条件不利),但干扰不常见,就易形成耐受型对策^[32,33]。本文的 4 个种群从东到西分别来源于典型草原东部、典型草原中部和典型草原西部,水热状况形成一定的梯度,而且通过土壤养分的测定也可以看出土壤从东到西越来越变得贫瘠,这种明显不同的生境是克氏针茅不同种群间形态差异的基础。克氏针茅从东到西的这种增加生殖投入的生活史对策可以认为是从竞争型到耐受型的一系列过渡类型。本文中克氏针茅的生殖投入差异是不同种群对所处生境适应的结果,但是这种适应在遗传上是否被固定下来,即该种的生活史特征是否发生分化形成其生活史型的差异,还有待进一步研究。

(3) 繁殖取决于生长前期积累的营养物质和分生组织,从而大个体比小个体的种子产量高^[34]。在较差的生境中克氏针茅生殖枝高度和干重较高,产生的种子量较大。一般来讲,水分状况良好有利于果实伸长^[18],而本文 4 个种群的种子长没有明显的变化趋势,这说明克氏针茅种子长与生境没有相关性,与赵萌丽等的研究结果一致。结实性是影响种群维持和种子散布的一个重要因素^[35]。Harper 研究认为种子数量和散布距离之间呈负指数关系,也就是指种子数量增加 20%,散布距离增加 80%^[36]。本文较差生境中克氏针茅生殖枝产生的种子数量较多,这样也有利于其散布,在一定程度上可以扩大种群的范围。籽实千粒重可以反映籽实中养分的积累状况,也是籽实成熟度的重要指标^[37]。生境较差的克氏针茅种子千粒重较重,种子内积累的养分较多,较多的养分为其在恶劣的生境中萌发及初期的生长提供了有利的条件。

参 考 文 献

1. 陈世鏞, 李银鹏, 孟君, 等. 内蒙古几种针茅特性和生态地理分布的研究[J]. 内蒙古农牧学院学报, 1997, 18(1) : 40 - 46.
2. 李德新. 放牧对克氏针茅草原影响的初步研究[J]. 中国草地学报, 1980 : 1 - 8.
3. 陈世鏞, 李存福. 强度放牧与天然草场资源的关系[J]. 内蒙古农牧学院学报, 1986, 7(5) : 81 - 86.
4. 李青丰, 易津, 张力君, 等. 针茅种子萌发检验标准及幼苗发育特征的研究[J]. 草业科学, 1995, 12(4) : 51 - 52.
5. 詹学命, 李凌浩, 李鑫, 等. 放牧和围封条件下克氏针茅草原土壤种子库的比较[J]. 植物生态学报, 2005, 29(5) : 747 - 752.
6. 白永飞, 徐志信. 典型草原 9 种牧草生长发育规律的研究[J]. 中国草地, 1994 : 21 - 27.
7. 孟君, 陈世鏞. 克氏针茅繁殖的生态生物学特性[J]. 内蒙古农牧学院学报, 1997, 18(2) : 33 - 37.
8. 张昊, 李鑫, 姜凤和, 等. 水分对克氏针茅和冷蒿生殖生长的影响[J]. 草地学报, 2005, 13(2) : 106 - 110.
9. 韩冰, 赵萌丽, 珊丹. 不同退化梯度克氏针茅种群形态及等位酶的分析[J]. 草业科学, 2004, 21(12) : 78 - 82.
10. 韩冰, 王俊, 赵萌丽, 等. 退化梯度对克氏针茅种群遗传分化的影响[J]. 草地学报, 2003, 11(2) : 146 - 153.
11. 赵念席, 高玉葆, 王金龙, 等. 内蒙古中东部草原区克氏针茅种群遗传分化的 RAPD 研究[J]. 生态学报, 2006, 26(5) : 1312 - 1319.
12. 朱玉洁, 高琼, 刘峻杉, 等. 基于气孔导度和光合模型的植物功能类群合并问题[J]. 植物生态学报, 2007, 31(5) : 873 - 882.
13. 王金龙, 高玉葆, 白宇, 等. 大针茅(*Stipa grandis*)和克氏针茅(*Stipa krylovii*)对 PEG 渗透胁迫适应性反应的比较研究[J]. 南开大学学报, 2005, 38(4) : 127 - 131.
14. 何兴东, 丛培芳, 高玉葆, 等. 利用压力—容积曲线研究四种草本植物的抗旱性[J]. 南开大学学报: 自然科学版, 2006, 39(3) : 16 - 21.
15. 王艳芳, 韩冰, 张占雄. 锡林郭勒盟草原克氏针茅抗旱生理变化的研究[J]. 草业科学, 2006, 23(2) : 22 - 26.
16. 燕玲. 内蒙古草原区针茅属植物颖果特征的比较研究[J]. 干旱区资源与环境, 1994, 8(4) : 76 - 79.
17. 王金龙, 高玉葆, 赵念席, 等. 内蒙古中东部草原克氏针茅形态特征和 RAPD 遗传分化的相关性研究[J]. 植物研究, 2006, 26(6) : 709 - 714.
18. 赵萌莉, 韩冰, 武金凤, 等. 克氏针茅群体变异研究初报[J]. 草地学报, 2003, 11(2) : 163 - 169.
19. 王立, 周婵, 杨允菲. 林间草地寸草苔种群的生长可塑性分析[J]. 中国草地, 2001, 23(4) : 6 - 10.
20. 杨允菲, 李建东. 东北草原羊草种群单穗数量性状的生态可塑性[J]. 生态学报, 2001, 21(4) : 752 - 758.
21. 曾杰, 白嘉雨. 植物天然居群表型变异研究的几个热点问题[J]. 广西林业科学, 2007, 36(2) : 65 - 70.
22. 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 1992 : 25 - 76.
23. 卢文岱. SPSS for Windows 统计分析[M]. 北京: 电子工业出版社, 2004 : 134 - 370.
24. 杨继. 植物种内形态变异的机制及其研究方法[J]. 武汉植物学研究, 1991, 20(4) : 429 - 434.
25. 杨允菲, 李建东. 东北羊草草原种群单穗数量性状的生态可塑性[J]. 生态学报, 2001, 21(5) : 753 - 758.
26. Sakai S. Optimal resource allocation to vegetative and sexual reproduction of a plant growing in a spatially varying environment[J]. Theor Biol, 1995, 175 : 271 - 282.
27. Olejniczak P. Optimal allocation to vegetative and sexual reproduction in plants: the effect of ramet density[J]. Evol Ecol, 2003, 17 : 265 - 275.
28. Gardner S N, Mangel M. Modeling investments in seeds, clonal offspring and translocation in a clonal plant[J]. Ecology, 1999, 80 : 1202 - 1220.
29. Tohru Nakashizuka, Yayoi Takahashi, Hideyuki Kawaguchi. Production-Dependent Reproductive Allocation of a Tall Tree Species *Quercus serrata*[J]. Journal of Plant Research, 1997, 110 : 7 - 13.
30. Hickman J C, Pitelka L F. Dry weight indicates energy allocation in ecological strategy analysis of plants[J]. Oecologia, 1975, 21(2) : 117 - 121.
31. Levins R. Theory of fitness in a heterogeneous environment. II. Developmental flexibility and niche selection[J]. Am Nat, 1963, 97 : 75 - 90.
32. Grime J P. Vegetation classification by reference to strategies[J]. Nature, 1974, 250 : 26 - 31.
33. Grime J P. Evidence for the existence of three primary strategies in plants and its relevance to ecological and evolutionary theory[J]. American Naturalist, 1977, 111 : 1169 - 1194.
34. Koelwijjn H P. Rapid change in relative growth rate between the vegetative and reproductive stage of the life cycle in *Plantago coronopus*[J]. New Phytologist, 2004, 163 : 67 - 76.
35. Richardson D M, Van Wilgen B W, Mitchell D T. Aspects of the reproductive ecology of four Australian *Hakea* species (Proteaceae) in South Africa[J]. Oecologia, 1987, 71 : 345 - 354.
36. Harper J L. Population biology of plants[M]. American Press: London, 1977 : 249 - 310.
37. 杨允菲, 祝玲. 松嫩平原天然羊草种群结实器官形状的波动与气候因子关系的研究[J]. 植物学报, 1993, 35(6) : 472 - 479.