小五台亚高山草甸与生境关系分析

黄晓霞¹ 江源^{2*} 刘全儒³ 黄秋如⁴

(1 云南大学资源环境与地球科学学院, 昆明 650091)
(2 北京师范大学资源学院, 北京师范大学中国生态资产评估研究中心, 北京师范大学环境演变与自然灾害教育部重点实验室, 北京 100875)
(3 北京师范大学生命科学学院, 北京 100875) (4 海南省气象局, 海口 570203)

摘要 该文结合野外植被调查, 在获取更为详细的景观尺度生境数据基础上, 探讨了小五台亚高山草甸植物群落与直接环境因子之间的定量关系。典范对应分析(CCA)的结果表明: 1) 在小五台的亚高山草甸分布地段, 热量、养分和水分条件构成了其生境特征差异的基本格局; 2) 用效应温度和太阳直接辐射量所表征的热量因子, 指示出研究区植物群落最基本的分化, 说明热量条件是制约研究区草甸群落分布的最重要的因子; 3) 养分状况的差异, 除了说明生境条件本身的差异外, 也在一定程度上指示了放牧干扰对群落分布的影响; 4) 由地形等因素控制的土壤表层水分状况, 则反映了草甸植物群落分布所受到的水分条件影响。
关键词 小五台 亚高山草甸 群落分布格局 典范对应分析 直接环境因子

RELATIONSHIP BETWEEN HABITATS AND COMMUNITIES OF SUBALPINE MEADOW ON MT. XIAOWUTAI, NORTH CHINA

HUANG Xiao-Xia¹, JIANG Yuan^{2*}, LIU Quan-Ru³, and HUANG Qiu-Ru⁴
¹School of Resource Environment and Earth Science, Yunnan University, Kunming 650091, China, ²College of Resources Science, China Ecological Capital Assessment Research Center, Beijing Normal University; Key laboratory of Environmental Change and Natural Disaster, Ministry of Education, Beijing 100875, China, ³College of Life Sciences, Beijing Normal University, Beijing 100875, China, and ⁴Meteorologic Bureau of Hainan, Haikou 570203, China

Abstract *Aims* Vegetation-environment relationships are key to understanding and predicting vegetation patterns in mountainous areas. Much research has examined vegetation patterns related to climate and topography; however, most studies have focused on forest and shrubland and habitats or examined relationships of vegetation and environmental factors along elevation gradients. Meadows have rarely been studied. We examined a subalpine meadow on the top of Mt. Xiaowutai (summit 2 882 m), the highest mountain of Hebei Province, North China, to relate communities to environmental factors.
Methods We examined vegetation data in relation to temperature, solar radiation and a soil wetness index simulated by GIS. Two-way indicator species analysis (TWINSPAN) was used to classify herbaceous communities, and the relationship between plant communities and environment was examined using canonical correspondence analysis (CCA).
Important findings The thermal gradient of temperature and direct solar radiation was the key factor correlated with community distribution in the study area, followed by soil nutrients, grazing and soil moisture as reflected by the soil wetness index, which is controlled by topography. This study indicates that habitat conditions, including temperature, solar radiation, soil wetness and nutrients, are the key factors which determine the distribution pattern of alpine meadow communities.
Key words Mt. Xiaowutai, subalpine meadow, distribution pattern of plant communities, CCA, direct environment parameters

山地植被与环境关系的探讨, 一直是植被生态学和山地生态学的核心问题之一(方精云等 2004)。国外的山地植被研究, 不仅探讨在中尺度乃至更大尺度范围上的环境条件变化对山地植被分布的影响, 特别是运用模型模拟等方法关注气候变暖对高山植物分布的潜在影响(Theurillat & Schlüssel,

收稿日期: 2006-02-17 接受日期: 2006-05-31
基金项目: 国家自然科学基金资助项目(40571001 和 40371043)和云南大学(理工)校级科研重点项目(2005Z005B)
野外取样得到了康慕谊教授、董世魁副教授、戴泉玉、莫旭昱、冯伟、张晶晶的帮助和支持, 特此致谢
* 通讯作者 Author for correspondence E-mail: jiangy@bnu.edu.cn
E-mail of the first author: huangxx@ynu.edu.cn

2000) ,亦在量化与植被分布密切相关的生态因子(主要是辐射、温度、水分、地形参数)等方面做了大量工作,并应用到景观尺度上的山地植被-环境关系解释,以及植被制图及关键物种的分布模拟当中(Iverson *et al.* , 1997 ;Pfeffer *et al.* , 2003) 。然而,这些研究多以森林(Dymond & Johnson , 2002)和灌丛植被(Franklin , 1998)为主,探讨高山草甸生境与植被群落及物种分布关系的相关研究相对较少。纵观国内山地植被生态学的研究,特别是华北地区山地植被的研究,通常以山地植被垂直带,或是以山地森林与灌丛植被为主进行分类与排序,探讨主要植被类型与环境的关系(张丽霞等, 2000 ;于澎湃等, 2002 ;田军等, 2003 ;刘鸿雁等, 2003 ;刘增力等, 2004) 。其中的高山或亚高山草甸,往往是作为植被类型整体进行研究,针对草甸植被特征与生境条件关系的分析尚不多见(张金屯, 1989 ;高贤明等, 1998 ;李素清等, 2005) 。可见,将山地植被垂直带中的高山、亚高山草甸植被作为研究对象,尝试将日益成熟的山地生境因子量化技术应用于其中,深入探讨主要群落类型与景观尺度上的生境条件之间的关系,尚有许多工作需要开展。因此,本研究选取了位于河北省小五台山东台顶部植被保存完好的亚高山地段,在掌握更详细的植被与生境数据的基础上,通过分析草甸植被本身的分异特征,以及与植物生长分布密切相关的水热条件和养分状况等生境因子在控制群落分布格局中的作用,探讨小五台亚高山草甸植被与生境条件之间的关系。以期为景观尺度上的高寒山地植被与环境关系的研究提供参考。

1 研究方法

1.1 研究地区概况

小五台山位于河北省蔚县境内,最高峰东台海拔 2 882 m。山体基带处于暖温带,基带植被类型属暖温带落叶阔叶林。本文所选的亚高山草甸区域位于小五台山东台海拔 2 200 ~ 2 880 m 左右地段,其面积约为 9.6 km²。其位置为 39.82° ~ 39.8° N, 115.04° ~ 115.06° E 之间。此处由于山高路远,人为扰动较少,仅有季节性放牧和挖药,以及短期的野营式旅游活动影响,植被保存相对完好。

据小五台西南部 50 km 处蔚县气象站(海拔 910 m)的气候资料,小五台山麓附近的年均温 6.4 °C,年降水量 418.2 mm。由于山上无气象观测资料,故推算所得海拔 2 250 m 以上山地的年均温为 -1.6 ~ -4.9 °C,年降水量 717 ~ 840 mm(于澎湃和刘鸿雁,

1997) 。土壤为褐土、棕色森林土与亚高山草甸土。

1.2 数据获取与处理

1.2.1 植被样方调查

主要采用景观格局样带法和样方记录法相结合进行。并充分考虑到山地景观如海拔高度、坡向和坡位等特征,在不同的景观部位,沿着典型环境梯度布设样带。整个研究区域内共布设研究样带 8 条(图 1) 。在每一条样带上,以海拔间隔 50 m 为标准设置一个 1 m × 1 m 样方,如有必要时加密样方布设。共计设置样方 76 个。样方调查内容主要包括种类组成、每种植物的平均高度、投影盖度、地上生物量等群落学特征。同时对人类活动的影响也进行了观测记录。

图 1 小五台山地形特征及调查样带位置
Fig.1 Topography of the study area and distribution of the transects in Mt. Xiaowutai
I ~ VIII : 调查样带 Transects

1.2.2 土壤采样与分析

植被调查的同时测定样方的土层厚度(样方内外的 3 次重复),并挖取根系层土壤充分混合后的样品,测定其 pH 值、有机质含量和全氮含量 3 项指标。其中,pH 值用电位法,有机质用油浴加热-重铬酸钾容量法,全氮用凯氏定氮法进行分析测定。

1.2.3 温度测定

转化糖方法是一种以蔗糖在酸性溶液中水解为葡萄糖和果糖(转化糖)反应为基础的温度测定方法,测得的“效应温度”反映温度对化学或生化过程作用强度,该温度值虽高于器测平均温度值,但强调温度条件对过程的作用效果,因而适于应用在复杂

景观条件下的温度空间变化及其生态作用研究(江源 2000)。在研究区内不同海拔高度、坡度、坡向和坡位等多种景观部位用转化糖方法测定反映生境热量条件的效应温度,测量时间段为 2001 年 7 月 26 日~9 月 12 日。在此基础上应用 Kriging 方法插值,获得研究区效应温度分布图。

1.2.4 太阳直接辐射

由于山地太阳直接辐射量没有实测数据,本文采用了模型模拟的方法。经分析比较,选用 ArcView 的扩展模块 Solar Analyst(Fu & Rich,1999),结合 1:50 000 地形图基础上生成的研究区 DEM 模型,模拟在进行野外调查时的生长季内,景观各部位所接收到的太阳直接辐射量。模拟结果如图 2 所示。

1.2.5 土壤水分状况

土壤水分状况用可描述汇水范围和位置对土壤水分累积作用影响(Beven & Kirkby,1979)的土壤湿润度指数(Wetness index)亦称为复合地形指数,Compound topographic index)表示。主要根据 Beven 和 Kirkby(1979)提出的公式(1)计算研究区内各个像元(10 m×10 m)的土壤湿润度指数(Beven & Kirkby,1979;Quinn *et al.*,1995):

$$W_T = \ln(A/\tan\theta) \tag{1}$$

式中: W_T 为像元的土壤湿润度指数; A 为单位等高线长度上垂直于径流方向的上游汇水面积; θ 为像元的平均坡度。模拟结果(图 3)基本显示了研究区域内在总体降水量一致的情况下,土壤表层水分在各地形部位的再分配状况。

1.2.6 植被数量分析

用双向指示种分析方法(TWINSPAN)对群落进行分类,在此基础上进行群落和物种的 CCA 排序分析。TWINSPAN 使用 Cornell Ecological Programs 完成,CCA 排序使用 CANOCO 软件完成。排序和分类均使用物种的总优势比(SDR)作为参数($SDR = \text{相对盖度} + \text{相对高度}$)。

CCA 分析所选取的环境参数主要为与植物生长直接相关的生态因子,如生境中的光照、温度、水分、养分等状况。包括:1)效应温度(TEMP):在研究区的效应温度场分布图基础上,提取各样方的效应温度数值;2)太阳辐射(SUN):从太阳直接辐射量模拟分布图上提取;3)水分(WET):从研究区土壤湿润度系数分布图上提取相应数值;4)养分(OM、TN):分析根系层土样得到的有机质(OM)含量和全氮(TN)含量数据;5)pH 值:样方土壤酸碱度的实测值;6)土层深度(SOIL):各样方土层深度 3 次重复测量的平均值。

以喜阳、喜光、耐寒、耐旱的石生植物为主。中国风毛菊占绝对优势,紫苞风毛菊和岩茴香成为次优种。主要伴生种为密花岩风(*Libanotis condensata*)扁囊苔草(*Carex coriophora*)雪白委陵菜(*Poten-*

tilla nivea)白景天(*Sedum pallescens*)西伯利亚早熟禾(*Poa sibirica*)翠雀(*Delphinium grandiflorum*)广布野豌豆(*Vicia cracca*)等。

图4 TWINSpan 对小五台所有样方分类的结果

Fig.4 TWINSpan diagram of the plots in Mt. Xiaowutai
0. All sample plots I. *Sedum pallescens* , *Saussurea chinensis* II-1. *Festuca litvinovii* , *Libanotis condensata* , *Rumex acetosa* II-2. *Scabiosa tschiliensis* , *Sanguisorba officinalis* , *Delphinium grandiflorum* III-1. *Delphinium grandiflorum* , *Ligusticum tachiroei* , *Tephrosia rufa* var. *chaetocarpa* III-2. *Myosotis sylvatica* , *Thalictrum petaloideum* , *Corydalis hsiawutaishanensis* III-3. *Plantago depressa* , *Ligusticum jeholense* 1. Ass. *Saussurea chinensis* + *Saussurea iodostegia* 2. Ass. *Kobresia myosuroides* + *Potentilla nivea* + *Hedysarum inundatum* 3. Ass. *Kobresia myosuroides* + *Hedysarum inundatum* 4. Ass. *Kobresia myosuroides* + *Polygonum viviparum* + *Carex duriuscula* 5. Ass. *Kobresia myosuroides* + *Scabiosa tschiliensis*

表 1 小五台研究区草甸群落的主要特征
Table 1 Characteristics of the meadows in Mt. Xiaowutai

群落类型 Plant association	样方数 Samples	坡向 Aspect	坡度 Slope	盖度(%) Cover	高度(cm) Height	物种数 Species	多样性指数 Shannon index
中国风毛菊+紫苞风毛菊+岩茴香 Ass. <i>Saussurea chinensis</i> + <i>Saussurea iodostegia</i> + <i>Ligusticum tachiroei</i>	2	—	—	80~95	10	26	3.00
蒿草+雪白委陵菜+湿地岩黄芪 Ass. <i>Kobresia myosuroides</i> + <i>Potentilla nivea</i> + <i>Hedysarum inundatum</i>	37	W	30~35	94~98	10~20	25~32	3.00~3.30
蒿草+湿地岩黄芪 Ass. <i>Kobresia myosuroides</i> + <i>Hedysarum inundatum</i>	12	N	28~38	90~100	10~15	25~30	3.19~3.25
蒿草+珠芽蓼+卵穗苔草 Ass. <i>Kobresia myosuroides</i> + <i>Polygonum viviparum</i> + <i>Carex duriuscula</i>	7	SW	25~30	50~80	5~10	20~30	2.63~3.25
蒿草+华北蓝盆花 Ass. <i>Kobresia myosuroides</i> + <i>Scabiosa tschiliensis</i>	18	S, SE	30~40	90~95	10~15	30~34	2.94~3.38

2.2.2 蒿草+雪白委陵菜+湿地岩黄芪群丛 (Ass. *Kobresia myosuroides* + *Potentilla nivea* + *Hedysarum inundatum*)

典型的亚高山草甸植物蒿草、紫苞风毛菊、雪白委陵菜、珠芽蓼(*Polygonum viviparum*)和湿地岩黄芪(*Hedysarum inundatum*)成为主要优势种,扁囊苔草、

西伯利亚早熟禾、香青(*Anaphalis sinica*)、岩茴香、草(*Koeleria cristata*)、西伯利亚三毛草(*Trisetum sibiricum*)等可成为次优势种。主要伴生种为白缘蒲公英(*Taraxacum platyepidum*)、发草(*Deschampsia caespitosa*)、红舌狗舌草(*Tephroseris rufa*)、疏齿银莲花(*Anemone obtusiloba*)、绢茸火绒草(*Leontopodium smithianum*)、大拟鼻花马先蒿(*Pedicularis rhinanthoides*)、喜马拉雅蝇子草(*Silene himalayensis*)等。

2.2.3 嵩草 + 湿地岩黄芪群丛(Ass. *Kobresia myosuroides* + *Hedysarum inundatum*)

群落优势种以湿地岩黄芪、紫苞风毛菊、嵩草、密花岩风、扁囊苔草为主,伴生种除了西伯利亚早熟禾、边向花黄芪(*Astragalus moellendorffii*)、珠芽蓼、瓣蕊唐松草(*Thalictrum petaloideum*)等植物外,还出现了酸模(*Rumex acetosa*)、勿忘我(*Myosotis sylvatica*)、高山紫菀(*Aster alpinus*)、毛茛(*Ranunculus japonicus*)、双花黄堇菜(*Viola biflora*)等喜阴湿、耐寒的植物。

2.2.4 嵩草 + 珠芽蓼 + 卵穗苔草群丛(Ass. *Kobresia myosuroides* + *Polygonum viviparum* + *Carex duriuscula*)

除紫苞风毛菊、珠芽蓼、雪白委陵菜、嵩草等常见的优势植物以外,卵穗苔草、白缘蒲公英等也成为这里的主要物种,伴生种多为一般分布在较低海拔的草、宽苞棘豆(*Oxytropis latibracteata*)、胭脂花(*Primula maximowiczii*)、卷耳(*Cerastium arvense*)等物种,同时出现耐践踏的伴人植物平车前(*Plantago depressa*)、辽藁本(*Ligusticum jeholense*)等。

2.2.5 嵩草 + 华北蓝盆花群丛(Ass. *Kobresia myosuroides* + *Scabiosa tschiliensis*)

除了嵩草、紫苞风毛菊、雪白委陵菜以外,喜温、耐旱的华北蓝盆花(*Scabiosa tschiliensis*)、地榆(*Sanguisorba officinalis*)等成为这里的优势种。伴生种也以香青、卷耳、细柄茅(*Ptilagrostis mongholica*)、黑柴胡(*Bupleurum smithii*)、砧草(*Galium boreale*)、广布野豌豆(*Vicia cracca*)、边向花黄芪、大叶龙胆(*Gentiana macrophylla*)、瓣蕊唐松草等喜光、温的植物为主。

2.3 群落的 CCA 排序

将小五台草甸群落的 TWINSpan 分类结果,结合环境变量进行 CCA 排序分析。

表 2 列出了各环境因子与 4 个排序轴之间的关系。CCA 排序结果显示:第一排序轴与土壤有机质含量以及太阳直接辐射量和效应温度都有非常显著的相关关系,第二排序轴与太阳辐射及效应温度仍然存在显著相关,而第三排序轴与效应温度和土层厚度关系较大,第四排序轴则主要反映了土壤湿润度指数的影响。4 个轴特征值占总特征值的 16.6%。由此可见,在小五台亚高山草甸分布区域,生境内的光照、温度、水分及养分状况共同影响着植物的生长和分布。特别是养分状况在不同生境之间存在较大差别,而太阳辐射以及效应温度所反映的热量状况应该在研究区的群落分布格局形成中起到重要作用,土壤湿润度指数所反映的生境水分状况的影响则不是十分显著。

图 5 显示了将全部 76 个样方表达在第一、第二

表 2 各环境因子与 CCA 排序轴之间的相关系数
Table 2 The correlation coefficients between CCA ordination axes and environmental factors

	AX1	AX2	AX3	AX4	总量 Total inertia
效应温度 Effective temperature	-0.454***	0.414***	-0.371***	-0.125	
太阳直接辐射量 Direct solar radiation	-0.560***	0.422***	0.038	0.172	
土壤湿润度指数 Wetness index	-0.091	-0.366***	-0.308***	0.433***	
土壤有机质 Organic matter content	0.628***	0.335***	-0.155	0.191*	
土壤全氮 Total nitrogen content	0.305***	0.264**	-0.134	0.142	
土壤 pH 值 pH of soil	-0.134	-0.062	-0.177	-0.267**	
土层厚度 Soil thickness	-0.035	-0.343***	-0.389***	-0.162	
特征值 Eigenvalues	0.152	0.116	0.110	0.057	2.614
累积贡献率 Cumulative ratio(%)	5.8	10.3	14.5	16.6	

*** : $p < 0.01$ ** : $p < 0.05$ * $p < 0.1$

排序轴平面上,并依据 TWINSpan 结果分类的排序结果。环境因子对排序轴的贡献反映为箭头的长度,这些因子之间的关系反映为箭头的方向与夹角。从图中可以看到,热量、养分、水分 3 大类环境因子

指示出了小五台研究区生境条件的基本差别。养分和热量状况对群落排序的贡献较大,与第一、第二轴都有很好的相关,特别是效应温度和太阳辐射因子,将阴坡的嵩草 + 湿地岩黄芪群丛与阳坡的嵩草 + 华

北蓝盆花群丛以及处于过渡生境的高草 + 雪白委陵菜 + 湿地岩黄芪群丛区分开来,而从养分状况来看,放牧扰动影响显著的高草 + 珠芽蓼 + 卵穗苔草群丛明显低于其它群丛,反映了群丛退化、质量降低的趋势。第二排序轴上,除了热量与养分的影响,水分和土层厚度的作用也比较明显,放牧扰动群丛的这两个参数值较高,与其主要分布在坡的中下部,土层较为深厚,水分状况良好有关。而从整个研究区看,土壤 pH 值的差异并不明显,其影响不大。

图5 小五台主要群丛类型的 CCA 排序结果
Fig. 5 Diagram of plots along the first and second axes of CCA ordination
SUN : 太阳辐射 Solar radiation TMP : 温度 Temperature OM : 有机质 Organic material TN : 全氮 Total N WET : 水分 Wet SOIL : 土壤深度 Soil depth

3 结论与讨论

在山地景观尺度生境的水热特征量化基础上,对小五台研究区草甸植被的 CCA 分析结果表明,在小五台的亚高山草甸分布地段,热量、养分和水分条件构成了其生境特征差异的基本格局。

3.1 热量因子与群落分布

群落分布格局表现出与表征热量特征的效应温度和太阳直接辐射量的显著相关,在第一、第二轴上的相关系数都比较高。在热量梯度上,占据温度较

高,光照充裕位置的是处于向阳地段的高草 + 华北蓝盆花群丛,以及坡顶部位的中国风毛菊 + 紫苞风毛菊 + 岩茴香群丛,其生境的效应温度在 17 ℃ 左右,太阳辐射约 2 607 MJ·m⁻²,主要以喜温、耐旱的物种为优势。而高草 + 湿地岩黄芪群丛在排序图上处于低温、阴凉的位置,效应温度约 12 ℃,太阳辐射约 1 561 MJ·m⁻²,与阳坡生境形成鲜明对比,正反映了该群丛所在的正北坡阴湿寒冷的生境特征,其优势种也以喜阴耐寒的植物为主。说明在研究区的亚高山草甸分布地段,热量状况成为制约草甸群落分布的最为重要的因子。

3.2 养分状况与群落分布

研究区养分状况的差异也较好地指示了草甸群落分布的格局,土壤有机质和土壤全氮含量与第一、第二排序轴都有较好的相关。位于养分梯度两端的是阴坡地形比较陡峭的高草 + 湿地岩黄芪群丛和通常处于坡的中下部坡度相对和缓的高草 + 珠芽蓼 + 卵穗苔草群丛。养分状况较好的高草 + 湿地岩黄芪群丛,土壤有机质含量平均为 4.6 g·kg⁻¹ DM,土壤全氮含量平均达 138.4 g·kg⁻¹ DM,远远好于放牧干扰影响强烈的高草 + 珠芽蓼 + 卵穗苔草群丛(土壤有机质含量均值为 3.1 g·kg⁻¹ DM,土壤全氮含量均值为 102.8 g·kg⁻¹ DM)的情况。除了生境本身的差异外,很可能是由于研究区季节性的放牧使得常受干扰区域的部分群落物种组成发生变化,同时也改变了其土壤理化性质,而造成土壤养分状况(特别是土壤有机质和全氮含量)的明显不同。

3.3 水分条件与群落分布

水分条件,特别是土壤水分是与植被生长最为密切的生态因子,但在高山、亚高山地段,水分因子往往并不成为植物生长的制约条件(Körner, 1999)。不过在本研究中,不同群落对水分状况的偏好差异还是非常明显的,位于阴坡的高草 + 湿地岩黄芪群丛及多分布在接近谷底位置的高草 + 雪白委陵菜 + 湿地岩黄芪群丛的土壤水分含量明显高于阳坡的高草 + 华北蓝盆花群丛和坡顶部位的中国风毛菊 + 紫苞风毛菊 + 岩茴香群丛,其分布表现出与水分状况较为显著的相关。山地土壤表层的水分状况由于受坡向、坡位、坡度、土层厚度等因素的影响,存在较大的变化。而本研究所模拟的土壤表层水分,在很大程度上受到地形条件的影响,因而水分条件也折射出了群落分布位置的差异。特别是区分出了研究区内分布于谷底位置的样方,其共同特点是土层比较深厚,土壤水分条件较好,湿润度较高。于是可以得

到水分条件对于研究区的草甸植物群落分布影响比较突出的结果。

3.4 其它生境条件与群落分布

实测的土层厚度在不同生境中的变化非常显著,这与局部小地形变化及其它因素有关,因此偶然性大。不过,土层厚度的影响还是表现出了与土壤水分的相似的效果,位于坡中下部的嵩草+珠芽蓼+卵穗苔草群丛,土层深度在 35.5 cm 左右,高于其它群丛 28 cm 左右的均值,土壤水分含量也确实高于其它群丛,说明土层厚度的增加有利于保持土壤水分,也就在一定程度上影响了植被的分布格局。而土壤 pH 值对于群落分布格局的影响不是非常显著。就调查结果而言,研究区内各样方的土壤 pH 值未表现出明显差异,可能与研究区域本身的范围不是太大,植被类型以及土壤类型比较一致有关。

由此可见,在山地复杂的地形条件下,群落生境条件的差异是非常显著的,小生境的光照、温度、水分及养分条件的不同组合,影响并控制着研究区亚高山草甸群落分布格局的形成。

参 考 文 献

- Beven KJ, Kirkby MJ (1979). A physically based, variable contributing area model of basin hydrology. *Hydrological Sciences Bulletin*, 24, 43 – 69.
- Dymond CC, Johnson EA (2002). Mapping vegetation spatial patterns from modeled water, temperature and solar radiation gradient. *Journal of Photogrammetry & Remote Sensing*, 57, 69 – 85.
- Fang JY (方精云), Shen ZH (沈泽昊), Cui HT (崔海亭) (2004). Ecological characteristics of mountains and research issues of mountain ecology. *Biodiversity Science (生物多样性)*, 12, 10 – 19. (in Chinese with English abstract)
- Franklin J (1998). Predicting the distribution of shrub species in southern California from climate and terrain-derived variables. *Journal of Vegetation Science*, 9, 733 – 748.
- Fu P, Rich PM (1999). Design and implementation of the solar analyst: an ArcView extension for modeling solar radiation at landscape scales. *Proceedings of the 19th Annual ESRI User Conference*. San Diego, USA. <http://www.esri.com/library/userconf/proc99/proceed/papers/pap867/p867.htm>.
- Gao XM (高贤明), Ma KP (马克平), Huang JH (黄建辉), Liu CR (刘灿然) (1998). Studies on plant community diversity in Donglinshan Mountain, Beijing, China. XI. The β diversity of mountain meadow. *Acta Ecologica Sinica (生态学报)*, 18, 24 – 32. (in Chinese with English abstract)
- Iverson LR, Dale ME, Scott CT, Prasad A (1997). A GIS-derived integrated moisture index to predict forest composition and productivity of Ohio forest (U.S.A.). *Landscape Ecology*, 12, 331 – 348.
- Jiang Y (江源) (2000). The indication value of plant communities in relation to temperature in hilly landscape. *Acta Phytocologica Sinica (植物生态学报)*, 21, 28 – 33. (in Chinese with English abstract)
- Körner C (1999). *Alpine Plant Life: Functional Plant Ecology of High Mountain Ecosystems*. Springer-Verlag, Berlin.
- Li SQ (李素清), Zhang JT (张金屯), Shangguan TL (上官铁梁) (2005). Quantitative classification and ordination of the sub-alpine meadows in Luyashan Mountain. *Acta Botanica Boreo-Occident Sinica (西北植物学报)*, 25, 2062 – 2067. (in Chinese with English abstract)
- Liu HY (刘鸿雁), Cao YL (曹燕丽), Tian J (田军), Dai JH (戴君虎), Tian YH (田育红), Cui HT (崔海亭) (2003). Vegetation landscape of the alpine timberline on Mt. Wutai, Shanxi Province. *Acta Phytocologica Sinica (植物生态学报)*, 27, 263 – 269. (in Chinese with English abstract)
- Liu ZL (刘增力), Zheng CY (郑成洋), Fang JY (方精云) (2004). Changes in plant species diversity along an elevation gradient on Mt. Xiaowutai, Hebei, China. *Biodiversity Science (生物多样性)*, 12, 137 – 145. (in Chinese with English abstract)
- Pfeffer K, Pebesma EJ, Burrough PA (2003). Mapping alpine vegetation using vegetation observations and topographic attributes. *Landscape Ecology*, 18, 759 – 776.
- Quinn PF, Beven KJ, Lamp R (1995). The $\ln(\alpha/\tan \beta)$ index: how to calculate it and how to use it within the TOPMODEL framework. *Hydrological Process*, 9, 161 – 182.
- Tian J (田军), Liu HY (刘鸿雁), Tian YH (田育红), Dai JH (戴君虎) (2003). Characteristics and spatial patterns of vegetation on the upper forest boundary on Mt. Guandi, Shanxi Province. *Journal of Mountain Science (山地学报)*, 21, 63 – 67. (in Chinese with English abstract)
- Theurillat JP, Schlüssel A (2000). Phenology and distribution strategy of key plant species within the subalpine-alpine ecocline in the Valais Alps (Switzerland). *Phytocoenologia*, 30, 439 – 456.
- Yu PT (于澎涛), Liu HY (刘鸿雁) (1997). Surface pollen and its climatological significance of vertical zone in Beitai, Xiaowutai Mountain. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis (北京大学学报(自然科学版))*, 33, 475 – 484. (in Chinese with English abstract)
- Yu PT (于澎涛), Liu HY (刘鸿雁), Cui HT (崔海亭) (2002). Vegetation and its relation with climate conditions near

the timberline of Beitai, the Xiaowutai Mts., Northern China. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 13, 523 – 528. (in Chinese with English abstract)

Zhang JT (张金屯) (1989). A preliminary study on *Kobresia* meadow on Wutai Mountains in Shanxi Province, China. *Journal of Shanxi University* (Natural Science Edition) (山西大学学报 (自然科学版)), 21, 353 – 360. (in Chinese with English abstract)

Zhang LX (张丽霞), Zhang F (张峰), Shangguan TL (上官铁梁) (2000). Vegetation diversity of Luya Mountains. *Biodiversity Science* (生物多样性), 8, 361 – 369. (in Chinese with English abstract)

责任编辑 : 倪 健 责任编辑 : 刘丽娟