太白山北坡光资源斑块与独叶草种群分布的耦合关系*

刘 喆[1,2] 岳 明[1**]

([1] 西部资源生物与现代生物技术省部共建教育部重点实验室, 西北大学, 西安 710069; [2] 国家林业局西北林业调查规划设计院, 西安 710048)

摘 要 独叶草(*Kingdonia uniflora*)是我国稀有濒危植物,在其分布区内呈斑块状分布。本研究采用数字影像技术、地理信息系统和数字冠层分析系统对太白山北坡独叶草分布地段林下光资源斑块、林冠结构特征、土壤理化性质进行了分析。结果显示:有独叶草分布的样方中光斑数量、光斑面积及光斑指数值均显著低于无独叶草分布的样方;有、无独叶草样方上层林冠结构差异显著,有独叶草分布地段的冠层散射透过系数、直射透过系数和林冠空隙面积均显著小于无独叶草分布地段,而叶面积指数与之相反;两类样方土壤理化性质均无显著差异。因此,推测在太白山北坡林下光斑可能是决定独叶草斑块状分布的主导因子之一。

关键词 独叶草; 光资源斑块; 种群分布; 数字影像; 冠层分析

中图分类号 Q948.13 **文献标识码** A **文章编号** 1000-4890(2014)4-0953-06

Coupling relationship between sunfleck and distribution of *Kingdonia uniflora* on the north slope of Mt. Taibai. LIU Zhe[1,2], YUE Ming[1**] ([1]*Key Laboratory of Resource Biology and Biotechnology in Western China* (*Northwest University*), *Ministry of Education*, *Xi'an* 710069, *China*; [2]*Northwest Institute of Forest Inventory*, *Planning and Design*, *State Forestry Administration*, *Xi'an* 710048, *China*). *Chinese Journal of Ecology*, 2014, **33**(4): 953-958.

Abstract: *Kingdonia uniflora* is an endemic endangered clonal species in China and shows a patchy distribution pattern on small scales within its distribution area. In the present study, using Digital Photography Technology, Geographic Information System and Digital Plant Canopy Imager, we analyzed the dynamics of sunfleck, canopy structure, soil physical and chemical properties in forest within the *K. uniflora* distribution on the north slope of Mt. Taibai in China. The results showed that the number and area of sunfleck and the sunfleck index in sampling plots were significantly lower with than without *K. uniflora*. There were significant differences in canopy structure between the two types of plots. The transmission coefficients for diffuse penetration, the transmission coefficients for radiation penetration and the canopy gap area in the plots were smaller with than without *K. uniflora*, while the leaf area index was vice versa. In addition, there were no statistically significant differences in measured soil physical and chemical properties among the two kinds of plots. Therefore, we speculate that sunfleck is likely one of leading factors determining the distribution of *K. uniflora* on the north slope of Mt. Taibai.

Key words: *Kingdonia uniflora*; sunfleck; population distribution; digital photography; canopy analysis.

独叶草(*Kingdonia uniflora*)属于毛茛科独叶草属多年生草本植物,是我国特有的单种属植物,呈斑块状分布于云南(德钦)、四川(峨嵋山、马尔康、九寨沟)、陕西(太白山及其周边地区)和甘肃(舟曲)四省的局部地区。该物种起源古老,系统位置孤立,分布区极为狭小,对生境的要求较为苛刻,已经被列为国家重点保护植物(狄维忠,1987)和中国生物多

* 教育部博士点基金项目(20116101110008)和陕西高校省级重点实验室科研项目(JH10256)资助。

** 通讯作者 E-mail: yueming@nwu.edu.cn

收稿日期: 2013-08-27 接受日期: 2013-12-06

样性的关键类群(陈灵芝,1993)。以往对独叶草的研究主要集中在形态学、解剖学、系统学及地理分布等方面(刘晓等,2000;雷永吉等,2000;李景侠等,2001a)。近年来,在其种群生态学及保护生物学方面已取得了一些进展,如独叶草种群分布格局(李景侠等,2001b)、秦岭独叶草生物量(张文辉等,2003a)、种群年龄结构(张文辉等,2004)及独叶草构件生长及其与环境的关系等(张文辉等,2003b)。这些研究初步阐明了独叶草种群分布格局的类型、营养构件(根、茎、叶)的生长发育过程及其与环境的关系,为独叶草的保护提供了一定的理论基础。但已有的研究对独叶草种群格局成因的解释意义仍是十分有限的。

太阳并非完美的点光源,因此当直射阳光穿过大小不一的林隙时,光线投在林床上形成林间光斑(sunfleck)(Baldocchi & Collnieau,1994)。光斑对林下植物的生长与分布起着至关重要的作用(Rich *et al.*,1993)。一些学者,如 Ustin 等(1984)应用叠氮纸(一种感光纸)及传统的胶片摄影技术考察了紫果冷杉幼苗分布与林下光斑的关系,发现决定紫果冷杉幼苗分布的主要因子是光斑出现的频率及强度。Selter 等(1986)的研究进一步证实了各种微环境异质性中,光斑的产生才是决定紫果冷杉幼苗分布的主导因子。

独叶草作为一种典型的呈游击型克隆生长的植物,小尺度上种群呈现集群分布的格局(李景侠等,2001b),但在稍大一点的尺度上,则呈斑块状分布于相对均一的环境中,其原因目前尚不清楚。本文以太白山北坡低、中、高3个海拔上的光斑、土壤及冠层结构与独叶草种群分布的关系进行了探讨,证实了光斑的产生可能是决定独叶草分布的主导因子之一。本研究表明,独叶草无性系分布地段看似均匀的微环境中可能存在某些细微但可度量的异质性。使用数字影像技术和 GIS 技术并结合数字冠层分析系统对太白山北坡独叶草分布区林下光斑的时空变化进行研究,以光斑指数(sunfleck index, *SI*)作为衡量林下光斑特征的指标,同时获取与光斑相关的地温、土壤养分及含水量等资源斑块的特征数据,建立资源斑块与独叶草种群分布的耦合关系,探讨其较大尺度上分布格局的成因,以期为独叶草的保护提供可靠的数据支撑和理论基础,并建立一种新的光斑动态格局研究的便捷方法。

1 研究地区与研究方法

1.1 研究区概况

研究地位于陕西省秦岭中段太白山国家森林公园(107°41′23″ E—107°51′40″ E,33°49′31″ N—34°08′11″ N),独叶草集中分布在海拔 2300~3200 m,生长期为 100 d 左右。该区域属亚寒带气候,年平均气温在-1~-2 ℃,年降水量 800~900 mm。土壤以山地暗棕壤为主,腐殖质层深厚。独叶草喜生于阴湿的原始林,分布地段植被类型主要是以牛皮桦(*Betula utilis*)、巴山冷杉(*Abies fargesii*)、太白红杉(*Larix chinenis*)和金背杜鹃(*Rhododendron clementinae* subsp. *aureodorsale*)等组成的纯林或混交林。在林下独叶草可单独形成大片的群丛,亦可和一些灌木及草本混生在一起(黎邦永和安里宁, 1989;应俊生等, 1990;李景侠等, 2001b)。

1.2 研究方法

1.2.1 野外调查 为了探讨独叶草种群分布与环境之间的关系,本研究地点选择在太白山国家森林公园的北坡,于 2006 年的 5 月中旬、7 月中旬和 8 月上旬分别在有独叶草分布和相邻的无独叶草分布地段设置 3 个 1 m×1 m 的样方(分别位于 2500、2800 和 3100 m),针对每一个样方调查以下内容:

1)光斑动态变化。在晴天条件下,将 Minolta D7i 数码相机竖直向下固定在三脚架(Gitzo 1228 配 Manfrotto 141RC 云台)上,镜头距地面垂直高度约为 1.75 m。将取景器中心对准样方中心,选择合适的焦距使样方的 4 个顶点尽可能大的进入取景器,固定此焦距。在光圈优先模式下,每间隔 20 min 尽量同时对 2 类样方进行拍摄,并立即在每个样方中随机选取 6 个光斑,分别对其光合有效辐射(PAR,数字式照度计 ST-80)以及对应的地表温度(红外测温仪 DT-880B)进行测量。

分别在 2006 年 5 月 16—22 日、7 月 18—26 日、8 月 7—12 日 3 个阶段进行,由于不同海拔上,独叶草均分布于北坡,光斑一般集中出现在 7:00—13:00左右,下午则基本上处于全荫蔽状态,无光斑产生。所以,拍摄时间基本从每天 7:00 开始,结束于 13:00 左右。共计拍摄 22 d,获得照片 396 幅,去除曝光不足和曝光过量的照片后,剩余有效照片 378 幅。

2)冠层结构。为了使曝光正常,选择阴天或太阳落山后在 3 个海拔上,分别随机选取 6 个有独叶

草和6个无独叶草分布的地段,借助冠层分析仪(CI-110 Digital Plant Canopy Imager),对其上层林冠进行测定分析。每次测量时在距离地面约1.2 m处,探头保持水平,按下拍摄按钮,即可获得一张高分辨率的鱼眼图像。

3)土壤资源斑块。在每个海拔上有无独叶草分布的相邻地段分别设置沿东西和南北方向的2条样线,样线长15 m。在各条样线上每隔2 m去除枯枝落叶,采土壤剖面0~20 cm的表层土200~250 g,带回室内测定土壤含水量、有机质、速效磷的含量以及土壤pH值等理化指标。

1.2.2　室内数据处理　1)光斑动态变化分析。首先,用Photoshop CS2软件对野外拍摄的照片进行校正,使图像的变形减少到最小。其次,将图像转化成灰度图。最后,将jpg格式转化成tif格式,使之成为光栅文件。然后借助地理信息系统软件(MAPGIS Release 6.5),在图形处理模块中使用输入编辑功能对光栅文件进行矢量化,以便能清楚地识别出光斑区域。接下来运用拓扑关系自动给光斑区域进行图形造区,再利用区编辑中的自动区标注功能,可以获得光斑区域的面积值。最后利用库管理模块中属性库管理功能,将面积值成批导出,转化成为Excel数据,从而得到样方内光斑的大小及个数,此数据进一步用于光斑面积频率分布及光斑指数的统计分析。

2)光斑指数。仅用PAR或光斑面积不能全面反映出光斑的特征,因此本文选取第i时刻光斑处平均光合有效辐射和该时刻总光斑面积构成评价因子。对光斑特征指标值SI,采取乘加法进行合成,定义光斑指数为:

$$SI = \sum (\bar{P}_i \times \sum S_i) \qquad (1)$$

式中,$\bar{P}_i$为第i时刻光斑下平均PAR值,$\sum S_i$为第i时刻总光斑面积。

3)冠层结构分析。对于通过冠层分析仪拍摄获取的半球图像,同样利用MAPGIS Release 6.5软件,得到每张图片上林冠空隙面积的大小。通过CI-110自带的分析功能,获得冠层叶面积指数、透光率等数据。

4)土壤理化性质分析。土壤含水量、pH值、有机质、速效P含量的测定,具体步骤参见鲍士旦(2000)。

5)数据处理。对所有数据进行方差分析,样本间的差异显著性均用Tukey检验。整个计算过程在OriginPro 7.5、Statistica 6.0和Excel 2003软件系统下完成。

2　结果与分析

2.1　图像的处理

野外拍摄的378张原始照片经过Photoshop CS2及MAPGIS Release 6.5处理后,可得到一系列如下图像。在此图像中可获得样方内光斑的大小及个数(图1)。

2.2　光斑的动态变化

不同海拔下,光斑面积频率分布表现一致,2类样方中小光斑数量较多。其中,低海拔处光斑面积集中在0~16 cm^2,而其他两处光斑面积都集中在0~8 cm^2。各种大小的光斑等级内,无独叶草样方中的光斑面积均高于有独叶草样方的光斑面积($P<0.05$),在中海拔处表现尤为明显(图2)。

相同时刻总光斑面积与光斑面积频率分布表现趋势相似,无独叶草样方中的总光斑面积显著高于有独叶草样方的总光斑面积。在12:40时2类样方中差异最大,无独叶草样方中总光斑面积是有独叶草样方的4.13倍。此外,由图3还可看出,随着时间的推移,2类样方中总光斑面积也逐渐增大,均在11:40时达到最大值,随后减小。

2.3　光斑指数及光斑下平均地表温度的变化

由表1可见,在独叶草生长的3个不同月份

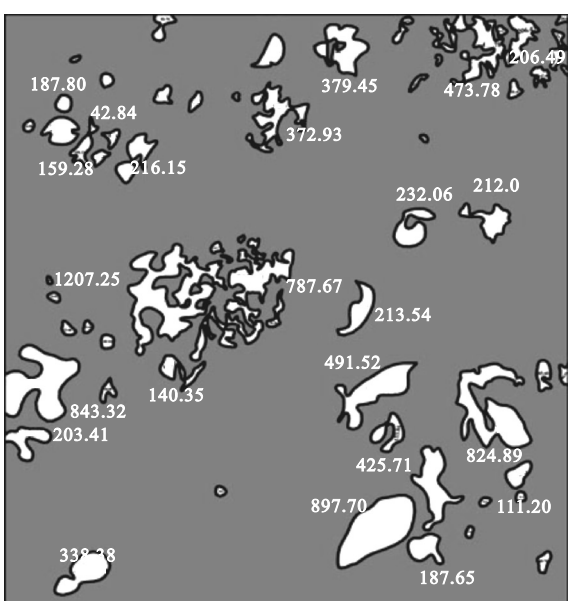


图1　处理后的图像示意图

Fig. 1　Processed picture

数字表示光斑区域的面积值。

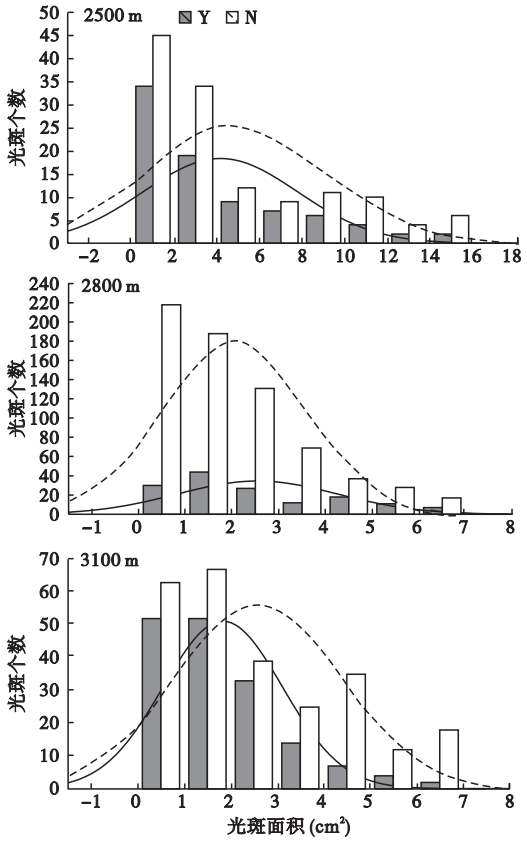


图2 不同样方中光斑面积频率分布

Fig. 2 Distribution frequency histogram of sunfleck area in different plots

Y. 有独叶草的样方,N. 无独叶草的样方。2500、2800和3100 m分别代表低、中、高3个海拔。

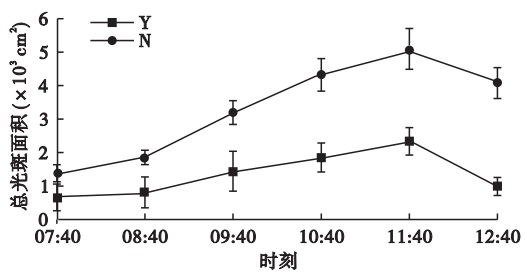


图3 不同样方中总光斑面积动态变化

Fig. 3 Dynamic change in total areas of sunfleck in different plots

Y. 有独叶草的样方,N. 无独叶草的样方。

表1 光斑指数和平均地表温度在不同月份,不同样方内的比较

Table 1 Comparison of *SI* and the average surface temperature among plots in different months

指标	样方类型	5月	7月	8月
光斑指数	Y	271.74±79.54 b	388.84±96.34 b	428.91±86.62 b
(*SI*)	N	814.30±169.52 a	1120.10±281.10 a	1220.44±340 a
平均地表	Y	12.26±1.84 b	15.49±1.51 b	16.81±2.10 b
温度(℃)	N	17.96±2.88 a	21.16±2.25 a	22.51±2.85 a

数据为平均数±标准差。Y表示有独叶草的样方,N表示无独叶草的样方。不同小字母表示同一月份有、无独叶草样方之间指标差异显著。下同。

表2 两类样方冠层散射透过系数、直射透过系数、叶面积指数及林冠空隙面积在不同海拔的比较

Table 2 Comparison of transmission coefficient for diffuse penetration, transmission coefficient for radiation penetration, leaf area index and canopy gap area between two types of plots at different altitudes

指标	样方类型	海拔(m)		
		2500	2800	3100
散射透过	Y	0.66±0.04 b	0.56±0.05 b	0.75±0.04 b
系数	N	0.74±0.02 a	0.65±0.04 a	0.81±0.03 a
直射透过	Y	0.48±0.06 b	0.26±0.02 b	0.57±0.02 b
系数	N	0.58±0.02 a	0.38±0.09 a	0.69±0.05 a
叶面积	Y	0.62±0.15 a	0.56±0.10 a	0.42±0.06 a
指数	N	0.45±0.07 b	0.38±0.10 b	0.27±0.05 b
林冠空隙	Y	99.80±9.13 b	95.81±4.63 b	109.15±7.26 b
面积	N	145±23.12 a	109.69±3.92 a	119.00±8.39 a

表3 两类样方的土壤理化性质比较

Table 3 Comparison of soil physical and chemical properties between two types of plots

指标	样方类型	海拔(m)		
		2500	2800	3100
含水量(%)	Y	86.3±2.1 a	85.8±2.2 a	85.8±4.1 a
	N	85.6±1.7 a	83.6±1.7 a	84.2±3.0 a
有机质(%)	Y	19.54±0.94 a	25.36±3.72 a	17.83±3.62 a
	N	18.67±2.40 a	24.10±3.02 a	16.77±3.18 a
速效P(mg·kg^{-1})	Y	6.88±0.78 a	7.94±0.99 a	6.76±0.54 a
	N	5.88±0.91 a	7.37±0.43 a	6.32±0.88 a
pH值	Y	5.38±0.27 a	5.35±0.27 a	5.18±0.19 a
	N	5.78±0.44 a	5.26±0.25 a	5.17±0.23 a

中,无独叶草样方中的*SI*值均显著大于有独叶草样方中的*SI*值($P<0.05$),并且平均地表温度也显著高于有独叶草样方($P<0.05$)。2类样方中地表温差平均为5.69 ℃。

2.4 冠层分析

表2显示,在不同海拔上,无独叶草样方上空散射透过系数、直射透过系数和林冠空隙面积均显著高于有独叶草样方($P<0.05$)。叶面积指数与之相反,表现为有独叶草的样方显著高于无独叶草样方($P<0.05$)。由此可见,独叶草选择性的生长在直射光、散射光较弱,林冠空隙面积小,叶面积指数较大的林冠下。

2.5 土壤理化性质

由表3看出,在低、中、高海拔上2类样方中土壤含水量、有机质含量及速效P含量均无显著差异($P>0.05$)。此外,3个海拔上的土壤均为酸性。

3 讨 论

董鸣(1996)在研究生境异质性时指出,林下克

隆草本植物处于一个斑块性的光环境中。Chazdon 等(1988)和 Pearcy 等(1988,1990)研究表明,对于林下受光抑制的植物来说,光斑是一个重要资源。Chazdon 和 Pearcy(1991)进一步从光子流密度,碳获取量以及与光斑相关的叶子尺寸和冠层结构等方面,对温带和热带森林中光斑变化格局进行了研究,发现光斑对林下植物的光合作用、生长、发芽以及繁殖都具有重要影响。Ross 等(1998)在可能辐射密度(IPDF)方程基础上,对植物林冠中不同冠层的 PAR 进行统计测量,并将此方法应用于柳树林冠中。Ross 等(2000b)在对柳树林冠结构研究中发现,林冠各层光斑的大小、数量、部分面积等对植物各部分生长作用不同。本研究通过对太白山国家森林公园北坡独叶草分布地段的观察,发现林下光斑现象比较明显,林下光斑存在时间上和空间上的异质性(图 2、图 3),有独叶草分布地段光斑个数及大小显著小于无独叶草分布地段,2 类样方的光斑指数及与光斑相关的平均地表温度间也均有显著差异(表 1)。Ustin 等(1984) 研究了光斑动态与加州紫果冷杉幼苗分布之间的关系,发现较少幼苗样方中的平均日辐射量是较多幼苗样方中的平均日辐射量的 2.1 倍,和幼苗较多地段的光斑出现频率相比,幼苗较少地段的光斑出现频率是其 3.5 倍。本文的研究结果与之基本相似。因此,林下光斑及与光斑相关联的微环境的差异可能是决定独叶草是否在某一具体地段分布的重要因素之一。

前已述及,林下光斑的出现有很大的时间和空间异质性。光斑大小、光斑辐照强度及光斑持续时间等参数均对林下光环境产生深刻影响。目前,已发展出几种方法来获得和描述光斑的参数,如光斑持续度、最大光斑 PPFD 和总光斑 PPFD 等(Lieffers *et al.*, 1999, Han *et al.*, 2003)。主要的方法有感应器测量(包括光量子感应器、辐射计感应器和光度感应器)、叠氮纸法(Diazo paper method)和半球影像法等。传统的光斑研究中用感应器测量需要大量的感应探头和数据收集设备,叠氮纸法则耗时费力且材料不易获取,传统的半球影像法在图像数字化过程中信息丢失较大,而冠层结构测定则为一种间接方法(Ross *et al.*, 2000a)。为便于比较不同地段光环境的差异,Ustin 等(1984)应用叠氮纸及传统的胶片摄影技术在考察紫果冷杉幼苗分布与林下光斑的关系时选用的是平均日辐射量。本文应用数字影像技术结合光斑 PAR 的即时测定,构建了光斑指数(*SI*)作为反映光斑特性的综合指标,可以方便快捷地给出包含光斑面积、光斑持续时间及光斑辐照强度在内的综合测度。应用该指数的结果显示(表 1),无独叶草样方的 *SI* 值均显著高于有独叶草样方,与单独采用光斑面积及冠层分析所得出的独叶草更加偏好荫蔽的林下环境的结果一致。

森林林冠结构对微环境起决定性的作用,影响着林下植物的生长和生存(Jennings *et al.*, 1999)。近年来,半球影像法被广泛地用来测定冠层结构(Whitmore *et al.*,1993;Trichon *et al.*, 1998;Beaudet *et al.*, 2002)。本研究表明,反映冠层结构的 3 个指标在有独叶草和无独叶草分布地段差异均显著。表明,独叶草倾向于生长在直射光和散射光均较弱而叶面积指数较大的林冠下,这是长期与环境相适应的结果,可能与其规避光合作用的光抑制有关(表 2)。林冠空隙的大小是冠层结构的重要特征(Poulson *et al.*, 1989;Canham *et al.*, 1990),大林冠空隙比小林冠空隙受到更多的光照,冠层空隙的大小与林下光斑的大小呈正相关(梁晓东和叶万辉,2001)。有独叶草处林冠空隙面积显著小于无独叶草处林冠空隙面积(表 2),证明了林下光斑的动态变化与独叶草的生长分布之间可能存在着一定的关系。

土壤是陆生生物的基质,是植物群落的主要环境因子(刘世梁等,2003)和植物生存的重要环境条件之一(张江英等,2007)。在相似的气候条件下,土壤理化性质的空间差异决定了植被分布的空间差异(钱亦兵等,2003)。本研究中,土壤 pH 值在不同海拔表现一致(表 3),约为 5.35,标准偏差较小,这与李志安等(2003)在南方典型丘陵退化荒坡地土壤研究结果一致,此研究证实了土壤 pH 值是变异系数最小的指标。从另一些理化指标分析看,不仅低海拔处 2 类样方中土壤含水量、有机质含量及速效 P 含量均无显著差异($P>0.05$),而且在中海拔和高海拔处也同样无显著差异($P>0.05$)。这表明,在太白山北坡独叶草分布地段内,土壤因子对独叶草种群的分布并不产生重要影响。

本研究利用数字影像技术和 GIS 技术可获取光斑大小、出现频率、季节性变化等特征,构建了光斑指数作为反映光斑特性的综合指标,可以方便快捷的给出光斑面积、光斑持续时间及光斑辐照强度在内的综合测度。与传统的叠氮纸法及光量子密度计方法相比,效率大为提高。但本方法在应用中也遇

到一些问题:一方面,由于下垫面中各种物质反光率不同,对样方中的光斑直接拍摄,会对光斑的分辨造成一定的困难;另一方面,先拍照再测量,影响测量的同步性,工作量大,需要在后续研究中加以改进;同时,在小尺度范围内能否通过统计分析的方法,更为准确地反映出独叶草种群分布格局和光斑的相关关系等问题也有待进一步研究。

致 谢 野外工作得到李育花、林玥和任坚毅三位同仁的鼎力帮助,写作中也受益于华南植物园叶万辉先生慷慨惠赠的资料,饶日光和程杰两位同事对本论文多次提出宝贵意见,谨向上述各位致以诚挚的谢意!

参考文献

鲍士旦. 2000. 土壤农化分析. 北京: 中国农业出版社.
陈灵芝. 1993. 物种多样性// 陈灵芝. 中国的生物多样性现状及其保护对策. 北京: 科学出版社: 31-100.
狄维忠. 1987. 独叶草// 于兆英. 陕西省第一批国家珍稀濒危保护植物. 西安: 西北大学出版社: 72-75.
董 鸣. 1996. 异质性生境中的植物克隆生长: 风险分摊. 植物生态学报, **20**(6): 543-548.
刘 晓, 王志诚, 马亦生, 等. 2000. 独叶草叶宏观形态性状的变异式样的初步研究. 西北植物学报, **20**(6): 1076-1081.
雷永吉, 任 毅, 岳 明. 2000. 珍稀濒危植物独叶草的分布及现状研究. 西北大学学报: 自然科学版, **30**(1): 75-80.
李景侠, 张文辉, 李 红. 2001a. 独叶草地理分布及生态学特性的研究. 西北林学院学报, **16**(2): 1-4.
李景侠, 张文辉, 李 红. 2001b. 稀有濒危植物独叶草种群分布格局的研究. 西北植物学报, **21**(5): 879-884.
黎邦永, 安里宁. 1989. 太白山自然保护区土壤考察报告// 李家骏. 太白山自然保护区综合考察论文集. 西安: 陕西师范大学出版社: 79.
梁晓东, 叶万辉. 2001. 林窗研究进展. 热带亚热带植物学报, **9**(4): 355-364.
刘世梁, 马克明, 傅伯杰, 等. 2003. 北京东灵山地区地形土壤因子与植物群落关系研究. 植物生态学报, **27**(4): 496-502.
李志安, 邹 碧, 曹裕松, 等. 2003. 南方典型丘陵退化荒坡地土壤养分特征分析. 生态学报, **23**(8): 1648-1656.
钱亦兵, 蒋 进, 吴兆宁. 2003. 艾比湖地区土壤异质性及其对植物群落生态分布的影响. 干旱区地理, **26**(3): 217-222.
应俊生, 李云峰, 郭勤峰, 等. 1990. 秦岭太白山地区的植物区系和植被. 植物分类学报, **28**(4): 261-293.
张文辉, 李 红, 李景侠, 等. 2003a. 秦岭独叶草种群个体和构件生物量动态研究. 应用生态学报, **14**(4): 530-534.
张文辉, 李景侠, 李 红, 等. 2004. 独叶草种群年龄结构及动态分析. 应用生态学报, **15**(4): 561-565.
张文辉, 王延平, 刘国斌. 2003b. 独叶草构件生长及其与环境的关系. 生物多样性, **11**(2): 132-140.
张江英, 周华荣, 高 梅. 2007. 艾里克湖湿地植物群落特征指数与土壤因子的关系. 生态学杂志, **26**(7): 983-988.
Beaudet M, Messier C. 2002. Variation in canopy openness and light transmission following selection cutting in northern hardwood stands: An assessment based on hemispherical photographs. *Agricultural and Forest Meteorology*, **110**: 217-228.
Baldocchi D, Collnieau S. 1994. The physical nature of solar radiation in heterogeneous canopies: Spatial and temporal attributes// Caldwell MM, Pearcy RW, eds. Exploitation of Environmental Heterogeneity by Plants. London: Academic Press: 21-64.
Chazdon RL, Williams K, Field CB. 1988. Interactions between crown structure and light environment in five rain forest piper species. *American Journal of Botany*, **75**: 1459-1471.
Chazdon RL, Pearcy RW. 1991. The importance of sunflecks for forest understory plants. *Bioscience*, **41**: 760-766.
Canham CD, Denslow JS, Platt WJ, *et al*. 1990. Light regimes beneath closed canopies and tree-fall gaps in temperate and tropical forests. *Canadian Journal of Forest Research*, **20**: 620-631.
Han Y, Chen H. 2003. Characteristics of light availability under forest canopies and its influences on photosynthesis of understory plants. *Forestry Studies in China*, **5**: 54-62.
Jennings SB, Brown ND, Sheil D. 1999. Assessing forest canopies and understory illumination: Canopy closure, canopy cover and other measures. *Forestry*, **72**: 59-74.
Lieffers VJ, Messier C, Stadt KJ, *et al*. 1999. Predicting and managing light in the understory of boreal forests. *Canadian Journal of Forest Research*, **29**: 796-811.
Pearcy RW. 1988. Photosynthetic utilisation of lightflecks by understory Plants. *Journal of Plant Physiology*, **15**: 223-238.
Pearcy RW, Roden JS, Gamon JA. 1990. Sunfleck dynamics in relation to canopy structure in a soybean (*Glycine max* (L.) Merr.) canopy. *Agricultural and Forest Meteorology*, **52**: 359-372.
Poulson TL, Platt WJ. 1989. Gap light regimes influence canopy tree diversity. *Ecology*, **70**: 553-555.
Rich PM, Clark DB, Clark DA, *et al*. 1993. Long-term study of solar radiation regimes in a tropical wet forest using quantum sensors and hemispherical photography. *Agricultural and Forest Meteorology*, **65**: 107-127.
Ross J, Sulev M, Saarelaid P. 1998. Statistical treatment of the PAR variability and its application to willow coppice. *Agricultural and Forest Meteorology*, **91**: 1-21.
Ross J, Mõttus M. 2000a. Statistical treatment of umbra length inside willow coppice. *Agricultural and Forest Meteorology*, **100**: 89-102.
Ross J, Mõttus M. 2000b. Statistical treatment of sunfleck length inside willow coppice. *Agricultural and Forest Meteorology*, **104**: 215-231.
Selter CM, Pitts WD, Barbour MG. 1986. Site microenvironment and seedling survival of Shasta red fir. *American Midland Naturalist*, **115**: 288-300.
Trichon V, Walter JMN, Laumonier Y. 1998. Identifying spatial patterns in the tropical rain forest structure using hemispherical photographs. *Plant Ecology*, **137**: 227-244.
Ustin SL, Woodward RA, Barbour MG, *et al*. 1984. Relationships between sunfleck dynamics and red fir seedling distribution. *Ecology*, **65**: 1420-1428.
Whitmore TC, Brown ND, Swaine MD, *et al*. 1993. Use of hemispherical photographs in forest ecology: Measurement of gap size and radiation totals in a Bornean tropical forest. *Journal of Tropical Ecology*, **9**: 131-151.

作者简介 刘 喆,女,1978年生,硕士研究生,主要从事植物生态学研究和森林资源监测。E-mail: jessiezhe@163.com
责任编辑 王 伟