

贾美玉,张金屯,宋振辉,等.五台山不同海拔林线森林斑块内草本群落与表层土壤特征[J].江西师范大学学报(自然科学版),2022,46(2):171-179.

JIA Meiyu,ZHANG Jintun,SONG Zhenhui,et al. The understory herbage community and surface soil characters at different altitudes of treeline forest patch in Wutai Mountain [J]. Journal of Jiangxi Normal University(Natural Science),2022,46(2):171-179.

文章编号:1000-5862(2022)02-0171-09

## 五台山不同海拔林线森林斑块内 草本群落与表层土壤特征

贾美玉<sup>1</sup>,张金屯<sup>2\*</sup>,宋振辉<sup>1</sup>,梁 钰<sup>2</sup>,张优倩<sup>1</sup>

(1. 东华理工大学水资源与环境工程学院,江西 南昌 330013;2. 北京师范大学生命科学学院,北京 10086)

**摘要:**该文选择五台山4个海拔梯度(2 200 m、2 250 m、2 300 m、2 350 m)的林线森林斑块为样地,对其林下的草本层和表层土壤(0~10 cm)进行野外调查取样和室内实验研究,运用指数、单因素方差分析、PERMANOVA分析、PCoA排序以及Pearson相关和Spearman秩相关进行分析.主要结果有:(i)在林线森林斑块内草本群落物种多样性在样地间差异不显著,但草本群落差异性显著受海拔梯度的影响.海拔2 350 m和2 300 m的2个样地群落物种组成相似性最小且群落相似性最小,海拔2 300~2 350 m引起了草本群落较大的变化.而海拔2 250 m和2 200 m的2个样地群落物种组成相似性最大,且群落相似性中等.推测海拔2 200~2 250 m的变化引起了物种地位的变化;(ii)单因素方差分析表明表层土壤pH值、全氮、全磷和全硫在不同海拔的林线森林斑块内呈显著变化,秩和检验结果表明有机碳在海拔梯度间变化不显著,全氮、全硫和有机碳的变化随海拔升高而增大;(iii)Pearson相关和Spearman秩相关的研究结果表明,土壤pH值与全氮、全硫、全磷和有机碳呈显著负相关,全氮、全硫、全磷和有机碳之间大多数呈显著正相关,这些土壤理化性质与植物多样性的相关性不显著.研究发现:在林线森林斑块内草本群落的海拔间变异受土壤理化性质的影响不显著,受海拔影响显著但变化趋势波动性较大,这可能与放牧和其他环境因子的影响有关,需设置更严格的控制实验来进一步分析.

**关键词:**海拔梯度;林线森林;林下草本;物种多样性;群落相似性;土壤理化性质

**中图分类号:**S 718.54 **文献标志码:**A **DOI:**10.16357/j.cnki.issn1000-5862.2022.02.09

### 0 引言

在全球气候变暖的背景下,自然高山林线海拔位置上升<sup>[1]</sup>,但受人为干扰严重的高海拔地区林线位置并没有明显上升甚至还有下降<sup>[2]</sup>.人工林已成为森林生态系统重要的组成成分.目前,有关人工林林线的研究大多数是对木本植物的研究,包括种群生长<sup>[3-4]</sup>、分布格局<sup>[5-6]</sup>、幼苗建立<sup>[7-8]</sup>、形态变异<sup>[9]</sup>,或者旅游干扰<sup>[10]</sup>、放牧干扰对森林系统的影响<sup>[11]</sup>.林线森林是一个脆弱的生态系统,其林下草本层是

其重要的组成部分,但却很少被作为重点研究对象.

林下植被是人工林生态系统的重要组成部分,具有促进系统养分循环、提高林地肥力、减少水土流失的作用<sup>[12]</sup>.林下草本物种大多数来源于高山草甸的物种入侵,它可以作为高山草甸替补的种子库参与过渡带物种的更新与信息交流,同时它可能对乔木种子的更新存在竞争作用<sup>[13]</sup>.因此,关于林线森林林下草本的研究对森林管理是至关重要的.林下草本植被群落主要受森林冠层郁闭度<sup>[14]</sup>、土壤养分和气候因子的影响.现有研究大多数集中在人工林恢复过程或不同年龄人工林林下植被方面<sup>[15-17]</sup>.海

收稿日期:2020-11-30

基金项目:国家自然科学基金(31170494),博士科研启动基金(DHBK2019103)和2022年江西省大学生创新创业训练计划(202210405025)资助项目.

作者简介:贾美玉(1988—),女,山西长治人,讲师,博士,主要从事植被多样性与格局分析研究. E-mail:meiyu.jia@163.com

通信作者:张金屯(1957—),男,山西运城人,教授,博士,博士生导师,主要从事数量生态学研究. E-mail:zhangjt@bnu.edu.cn

拔梯度包含温度、湿度、光照等诸多环境因子,是研究植物对全球气候变化响应的理想区域<sup>[18]</sup>。对海拔垂直变化的研究对象多为乔木,海拔作为在林线环境中关键的环境因子,其对草本分布也起决定性作用<sup>[19]</sup>。林线地区乔木的生理生态对环境变化反应相对迟钝,但草本层却很迅速,以海拔梯度作为控制变量研究林下植被可以较好地反映草本群落特征、土壤养分等变化,研究结果可以辅助分析乔木和灌木层的生长发育状况。

物种多样性作为生态系统的重要特征之一<sup>[20]</sup>,不仅可以作为评价生态系统发展状况的指标,还可以侧面反映生境的差异性与稳定性<sup>[21]</sup>。目前,多样性的研究大多数只考虑物种水平的多样性,对群落的相似性和多样性关注较少,而群落结构的研究是更深层次的探索,能更好地探寻植物对环境差异的响应。已有文献采用一些群落相关指数研究群落差异,这些指数简单方便但无法证明其显著性,应该采用新的研究方法和角度来全面了解群落的特征。

五台山属于温带落叶阔叶林区,是典型的高山林线山地<sup>[22]</sup>。由于林线气候、放牧和旅游的干扰,常常在不同的海拔处形成林线,因此存在着不同海拔的林线森林斑块。在林线森林斑块中的树种多为人工种植的华北落叶松,在乔木层中的多样性变化不显著,而林下草本植物作为森林生态系统的驱动力之一<sup>[23]</sup>,其群落组成及物种多样性在不同海拔的林线森林内的差异性还未知,研究它随海拔梯度如何变化不仅可以直接了解海拔对林线林下草本群落的作用,还可以间接反映在不同海拔的林线森林内环境的差异。M. V. Lomolino<sup>[24]</sup>认为:多样性与海拔梯度格局的关系在很大程度上依赖于环境变量之间的协调变化与相互作用,由于土壤养分是重要的环境因子,所以对土壤养分的研究非常重要。

本文以五台山南台和中台林线为研究区域,选择树龄 35 年左右、立地条件和面积比较相似的森林斑块为对象,对其林下草本和土壤进行调查分析。通过分析来探究:(i)海拔梯度对林下草本物种多样性、群落多样性和土壤元素的影响是否显著,其变化趋势与海拔梯度的变化趋势是否一致,试图寻找对林线草本群落变化的关键海拔值;(ii)在不考虑海拔梯度的情况下,在林线森林斑块内的土壤理化性质和草本多样性是否显著相关。

## 1 研究区概况

五台山位于山西省东北部(38°27'~39°15'N,

112°48'~113°50'E),属暖温带半湿润季风气候。五台山地区地形高耸,临近华北平原,是接受东南海洋夏季风送来的暖湿气团较早和最佳的场所,山顶年降水量为 900 mm 以上。五台县豆村镇年平均日照时数为 2 684.2 h,五台山的中台顶年平均日照时数为 2 722.8 h,日照率为 61%,日照充足<sup>[25]</sup>。由于地形变化较大,气候条件差异明显,所以土壤分布具有明显的垂直分布特征,从山麓到山顶依次出现褐土、山地褐土、山地淋溶褐土、山地棕壤、亚高山草甸土和高山草甸土。五台山的植物资源丰富,拥有华北地区面积最大的亚高山草甸<sup>[26]</sup>。根据气候指标推算,五台山属于暖温带落叶阔叶林区,并具有典型的高山林线山地<sup>[22]</sup>,因此它适合作为林线森林的研究。

## 2 材料与方法

### 2.1 野外取样与室内分析

2017 年 7 月初对五台山南台和中台进行调查,其中 3 个样地均设在南台的母树林基地内,1 个样地设在中台有相似林分结构的森林斑块内。以每个森林斑块上界的海拔值为海拔梯度值,用手持 GPS 定位仪进行踏查来确定选取海拔梯度分别为 2 350、2 300、2 250、2 200 m 的林线森林斑块作为研究样地。采用随机系统取样<sup>[27]</sup>的方法,在每个研究样地中部随机选取 2 个 10 m×10 m 的样方,分别以这 2 个样方为起点做 2 条平行样带。采用带有刻度的样绳(100 m)为工具,从上林缘位置开始设置第 1 个正方形的 10 m×10 m 的样方,然后沿着样地坡向的方向设置样带,直到下林缘为止,每条样带均匀设置 4 个 10 m×10 m 的样方,另一条样带与之前的样地平行。2 条样带共设 8 个样方,在每个样方中进行草本群落调查,并采集表层(0~10 cm)土壤样品带回实验室分析。

草本群落调查:对样方内草本物种进行识别,记录每种植物的高度和盖度信息。

土壤样品调查与分析:在每个 10 m×10 m 样方的对角线方向上选取 3 个采样点(中间 1 个,接近样方的角落各 1 个),在每个采样点处对 0~10 cm 深度的土样进行取样并混合成 1 个土壤样品带回实验室,对土壤 pH 值、全氮、有机碳、全磷和全硫指标进行分析。采用电极法进行土壤 pH 值测定,用全自动凯氏定氮仪进行土壤全氮的测定,用重铬酸钾氧化-外加热法进行土壤有机碳的测定,用酸溶钼锑抗比色法进行土壤全磷的测定,用燃烧碘量法和 EDTA

间接滴定法进行森林土壤全硫的测定.

## 2.2 数据分析

在确定每个物种的拉丁名之后,统计在不同海拔梯度的样地内的草本群落物种组成,进而计算每个物种在每个样方内的重要值,采用重要值数据进行分析. 群落相似性、物种多样性的分析. 计算公式<sup>[27]</sup>如下:

(i) 重要值  $P_i = (M_i + N_i)/2$ , 其中  $M_i$  为相对盖度(即物种  $i$  的盖度占样方内所有物种盖度之和的比例),  $N_i$  为相对高度(即物种  $i$  的平均高度占样方内所有物种的平均高度之和的比例).

(ii) Patrick 丰富度指数  $R = S$ , Simpson 指数  $D = -\ln \sum_{i=1}^S P_i^2$ , Shannon-Weaner 指数  $H = -\sum_{i=1}^S (P_i \cdot \ln P_i)$ , Pielou 均匀性指数  $E = -\sum_{i=1}^S (P_i \ln P_i) / \ln S$ , 其中  $S$  为物种数,  $P_i$  为物种  $i$  的重要值.

(iii) 群落相似性计算与检验<sup>[28-29]</sup>. 首先,以样方内的物种重要值和海拔梯度(分类变量)建立线性模型进行方差分析,方差分析的结果用近似  $F$  检验进行验证. 近似  $F$  检验公式为

$$F_p - F = S_B(N - t) / (S_W(t - 1)),$$

其中  $S_B$  为组间平方和,  $S_W$  为组内平方和,  $t$  为被划分的组数,  $N$  为所有样方数量.

其次,当群落组成差异显著时,需知道组内变异是否显著参与形成群落组成差异性. 为了检验组内变异的作用,采用 Bray-Curtis 方法计算相似距离,建立主坐标排序空间,计算组内(样地内各个样方)各样方到图心距离的均值,检验这个均值在组间的差异性,并用单因素 ANOVA 对各个组间均值进行方差分析. Bray-Curtis 距离计算公式为

$$d(i, j) = \sum_{k=1}^n |y_{i,k} - y_{j,k}| / \sum_{k=1}^n (y_{i,k} + y_{j,k}),$$

其中  $i$  和  $j$  为任意 2 个样方的代码,  $y$  为物种重要值,  $k$  为在 2 个样方中所有的物种数.

最后,若方差分析距离均值在组间的差异不显

著,则说明群落的空间位置是导致群落差异的主要原因;若方差分析距离均值在组间的差异显著,则群落组成的差异可能与样方间离差过大有关. 这时无法排除样方离差对群落组成的影响,但是可以借助 PCoA 观察分析在排序空间内样方的位置,从排序图上定性分析造成群落差异的主要原因.

(iv) 群落物种组成相似系数. 常用算法有 2 种,本文同时应用 2 种方法来分析物种组成相似性,计算公式<sup>[15,17]</sup>为  $C_{ij} = c / (a + b - c) \times 100\%$ ,  $I_{ij} = 2c / (a + b) \times 100\%$ , 其中  $a$  为样地  $i$  的物种数,  $b$  为样地  $j$  的物种数,  $c$  为在 2 个样地中共有的物种数.  $C_{ij}$  和  $I_{ij}$  值越大,物种组成相似性越大.

所有计算在 Microsoft Office Excel 2016 上进行,方差分析、多重比较和制图均在 R 3.4.3 软件(R Core Development Team 2017)下完成. 在进行方差分析之前先检查方差齐性,当方差不齐时采用非参数 Kruskal Wallis 分析组间的差异性,当方差齐性时采用单因素 ANOVA 方差分析组间的差异性,采用 Multcomp 软件包中的 glht() 函数进行多重比较. 在 Vegan 包下的 adonis2 函数进行 PERMANOVA 分析群落相似性(只能给出类似方差分析的显著性  $P$  值结果)、betadisper 函数检测在排序空间内组间距离的差异,并对 PCoA 分析作图.

## 3 结果

### 3.1 草本群落多样性的差异分析

对 Shannon-Weaner 指数、Pielou 均匀性指数和 Patrick 丰富度指数的单因素方差分析结果表明不同海拔的样地内草本群落物种多样性差异不显著,对 Simpson 指数的非参数 Kruskal Wallis 秩和检验结果也表明不同海拔的样地内草本群落物种多样性差异不显著. 物种多样性在 4 个海拔梯度下的差异不显著,但从多样性指数的均值大小排序可知高海拔林线的林下草本物种多样性均值较大(见表 1).

表 1 在不同海拔梯度下样地内物种多样性指数均值的方差分析和多重比较

多样性指数	海拔 2 350 m	海拔 2 300 m	海拔 2 250 m	海拔 2 200 m
Simpson 指数*	0.532 ± 0.063	0.450 ± 0.044	0.570 ± 0.170	0.332 ± 0.062
Shannon-Weaner 指数	0.594 ± 0.060	0.486 ± 0.040	0.474 ± 0.045	0.383 ± 0.062
Pielou 均匀性指数	0.227 ± 0.013	0.208 ± 0.010	0.205 ± 0.012	0.184 ± 0.011
Patrick 丰富度指数	14.250 ± 1.849	10.625 ± 1.117	10.125 ± 0.895	8.750 ± 1.859

注: \* 表示 Kruskal Wallis 分析差异不显著,其他为单因素方差分析. 数据结构为均值 ± 标准误.

### 3.2 不同海拔草本群落物种组成及相似性分析

Permanova 分析不同海拔梯度群落相似性的结

果是差异显著( $P = 0.019$ ),这表明群落内物种组成及重要值变化显著受海拔的影响. 通过计算在每个



样地内的物种个数可知:随海拔从高到低,样地内群落的丰富度依次为 34、28、34、24. 在 4 个海拔梯度样地内的共有物种有 12 个,仅存在于海拔 2 350 m 样地内的物种有 9 个,仅在海拔 2 300 m 样地内出现的物种有 7 个,仅在海拔 2 250 m 样地内出现的物种有 4 个,而海拔 2 200 m 的样地却无独有物种,各海拔梯度样地内的具体物种名如表 2 所示. 从每个海拔独有物种数可以看出:高海拔地区(2 350 m、2 300 m)林线林下草本物种与低海拔地区(2 250 m、2 200 m)林线林下草本物种的差别较大. 除 12 个共有物种外,仅在海拔 2 200 m 和 2 250 m 样地内共同出现的物种有 3 个,仅在海拔 2 300 m 和 2 350 m 样

地内共同出现的物种有 2 个,这说明:即使海拔相差 50 m,物种种类变化也会很大. 除 12 个共有物种外,在海拔 2 200 m、2 250 m 和 2 300 m 处都出现的物种有 2 种草本植物即雪白委陵菜和峨参(见表 2),这说明这 2 种植物不易在大于海拔 2 350 m 林下森林内生存(见表 3). 经过群落间样方到群落图心距离的均值的方差分析(见图 1)发现:草本群落内样方到图心距离的均值在 4 个海拔梯度下差异不显著. 这排除了样方间离差对结果的影响,即说明不同海拔的林线林下草本群落差异性是由不同海拔梯度的群落在排序空间内的位置差异决定的.

表 2 不同海拔样地内物种组成和重要值

物种	海拔梯度/m			
	2 350	2 300	2 250	2 200
疏齿银莲花( <i>Anemone obtusiloba</i> ) *	0.016	0.016	0.006	0.008
紫苞风毛菊( <i>Saussurea purpurascens</i> ) *	0.013	0.013	0.005	0.009
地榆( <i>Sanguisorba officinalis</i> ) *	0.058	0.005	0.055	0.021
珠芽蓼( <i>Polygonum viviparum</i> ) *	0.010	0.021	0.033	0.044
雪白委陵菜( <i>Potentilla nivea</i> )		0.028	0.003	0.009
异燕麦( <i>Helictotrichon schellianum</i> )	0.042	0.041		0.049
早春苔草( <i>Carex subpediformis</i> ) *	0.313	0.067	0.223	0.327
黑柴胡( <i>Bupleurum smithii</i> )	0.008	0.022		
小红菊( <i>Dendranthema chanetii</i> ) *	0.021	0.005	0.024	0.096
边向花黄耆( <i>Astragalus moellendorffii</i> )		0.003		
高山紫菀( <i>Aster alpinus</i> )		0.006	0.003	
卷耳( <i>Cerastium arvense</i> ) *	0.014	0.002	0.026	0.010
胭脂花( <i>Primula maximowiczii</i> ) *	0.005	0.021	0.013	0.007
三叶委陵菜( <i>Potentilla freyniana</i> ) *	0.120	0.120	0.101	0.042
多叶早熟禾( <i>Poa plurifolia</i> ) *	0.009	0.200	0.048	0.012
峨参( <i>Anthriscus sylvestris</i> )		0.090	0.008	0.004
北京假报春( <i>Cortusa matthioli</i> )		0.135	0.008	
魁薊( <i>Cirsium leo</i> ) *	0.006	0.004	0.008	0.013
双花堇菜( <i>Viola biflora</i> ) *	0.005	0.023	0.058	0.015
瞿麦( <i>Dianthus superbus</i> )		0.006		
岩青兰( <i>Dracocephalum rupestre</i> )	0.001		0.014	
路边青( <i>Geum aleppicum</i> )			0.004	0.064
瓣蕊唐松草( <i>Thalictrum petaloideum</i> )	0.002		0.011	0.002
白莲蒿( <i>Artemisia sacrorum</i> )	0.049		0.067	
内曲繁缕( <i>Stellaria infracta</i> )	0.042			
歪头菜( <i>Vicia unijuga</i> )	0.019			
龙牙草( <i>Agrimonia pilosa</i> )	0.049			
钝萼附地菜( <i>Trigonotis amblyosepala</i> )	0.016			
银露梅( <i>Potentilla glabra</i> )	0.019			
蓝花棘豆( <i>Oxytropis caerulea</i> )	0.010			
蓬子菜( <i>Galium verum</i> )	0.005			
勿忘草( <i>Myosotis sylvatica</i> )	0.014	0.002		
互叶金腰子( <i>Chrysosplenium alternifolium</i> )		0.098		

表 2(续)

物种	海拔梯度/m			
	2 350	2 300	2 250	2 200
白莲蒿( <i>Artemisia sacrorum</i> )	0.555		0.036	
紫花碎米荠( <i>Cardamine tangutorum</i> )		0.028		
光滑柳叶菜( <i>Epilobium amurense</i> )		0.028		
石防风( <i>Peucedanum terebinthaceum</i> )		0.006		0.004
华北耧斗菜( <i>Aquilegia yabeana</i> )		0.008	0.012	
乌苏里风毛菊( <i>Saussurea ussuriensis</i> )		0.002		
高原毛茛( <i>Ranunculus tanguticus</i> )		0.003		
高山唐松草( <i>Thalictrum alpinum</i> )			0.007	
八宝茶( <i>Euonymus przewalskii</i> )	0.026		0.007	
华北覆盆子( <i>Rubus idaeus</i> )	0.006		0.188	0.042
缬草( <i>Valeriana officinalis</i> )			0.013	
糙苏( <i>Phlomis umbrosa</i> )			0.010	
并头黄芩( <i>Scutellaria scordifolia</i> )			0.016	0.008
粗根老鹳草( <i>Geranium dahuricum</i> )	0.021		0.023	0.101
长柄唐松草( <i>Thalictrum przewalskii</i> )	0.019		0.004	
矮紫苞鸢尾( <i>Iris ruthenica</i> )	0.021		0.064	0.102
藜芦( <i>Veratrum nigrum</i> )			0.002	0.011
林荫千里光( <i>Senecio nemorensis</i> )			0.005	
鼠掌老鹳草( <i>Geranium sibiricum</i> )	0.003		0.004	0.020
金莲花( <i>Trollius chinensis</i> )	0.063			
小花草玉梅( <i>Anemone rivularis</i> )	0.016			

注:表中数据为物种重要值均值,\*标注的物种是4个样地都有的物种.

表 3 在不同海拔梯度样地内林下草本群落物种特征

群落特征	海拔梯度*/m( $P=0.019$ )			
	2 350	2 300	2 250	2 200
每个样地独有物种数	9	7	4	0
群落总物种丰富度	34	28	34	24
每个样地共有物种数	12	12	12	12

注:\*表明在 $P<0.05$ 水平下存在显著差异.

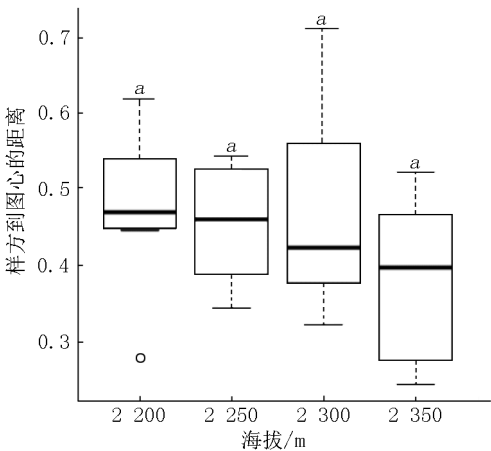
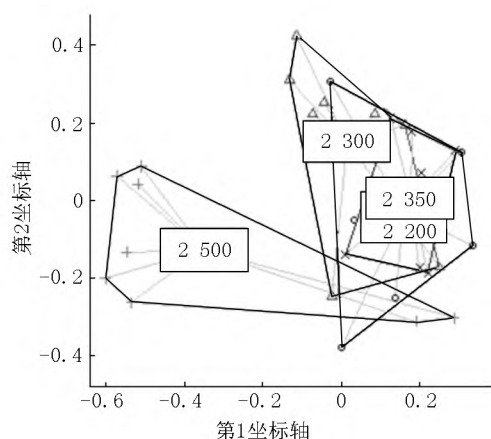


图 1 样方到图心距离均值的方差分析

从图 2 可以看出:不同梯度的群落排序空间的图心位置有差异.在海拔 2 200 m 和 2 350 m 的样地内群落图心位置几乎重叠,但海拔 2 200 m 群落的样方空间位置比海拔 2 350 m 处的更分散,这说明

在海拔 2 200 m 样地内草本群落变异较大,海拔 2 250 m 处样地与海拔 2 350 m 和海拔 2 200 m 样地群落的图心位置存在显著差异,但在海拔 2 300 m 处样地群落的图心位置与其他 3 个群落位置差距最大,这说明在海拔 2 300 m 处样地草本群落结构变化最大.群落图心间距离排序为  $D_{14} < D_{13} < D_{34} < D_{23} < D_{24} < D_{12}$ (见图 2).从表 4 的群落物种组成相似系数值可知:不同海拔梯度的样地间群落物种组成相似系数有差别,且 2 种计算方法得到的系数排序相同,即  $C_{34} > C_{24} > C_{13} > C_{23} > C_{14} > C_{12}$  和  $I_{34} > I_{24} > I_{13} > I_{23} > I_{14} > I_{12}$ .综上所述可知:图 2 的图心间距离排序结果与表 4 的群落物种组成相关系数排序结果不同,因此结合 2 者排序结果对群落的差异性进行分析.海拔 2 250 m 和 2 200 m 的 2 个样地群落物种组成相似性最大,但群落相似性中等;海拔 2 350 m 和 2 300 m 的 2 个样地群落物种组成相似性最小且群落相似性最小;海拔 2 350 m 和 2 250 m 的 2 个样地群落物种组成相似性中等但群落相似性较大;海拔 2 350 m 和 2 200 m 的 2 个样地群落物种组成相似性较小但群落相似性较大;海拔 2 300 m 和 2 250 m 的 2 个样地群落物种组成相似性中等且群落相似性中等;海拔 2 300 m 和 2 200 m 的 2 个样地群落物种组成相似性较大且群落相似性较小.



注:图心位置即为海拔数值标注所处的位置, $D_{12}$ 为海拔 2 350 m 的图心与海拔 2 300 m 的图心在 2 维排序轴上的距离, $D_{13}$ 为海拔 2 350 m 的图心与海拔 2 250 m 的图心在 2 维排序轴上的距离, $D_{14}$ 为海拔 2 350 m 的图心与海拔 2 200 m 的图心在 2 维排序轴上的距离, $D_{23}$ 为海拔 2 300 m 的图心与海拔 2 250 m 的图心在 2 维排序轴上的距离, $D_{24}$ 为海拔 2 300 m 的图心与海拔 2 200 m 的图心在 2 维排序轴上的距离, $D_{34}$ 为海拔 2 250 m 的图心与海拔 2 200 m 的图心在 2 维排序轴上的距离。

图 2 PCoA 排序上组内与组间距离

表 5 在不同海拔梯度下土壤理化性质的方差分析和多重比较

环境因子	海拔 2 350 m	海拔 2 300 m	海拔 2 250 m	海拔 2 200 m
土壤 pH 值	5.770 <sup>b</sup> ± 0.020	6.238 <sup>a</sup> ± 0.140	6.173 <sup>a</sup> ± 0.118	6.088 <sup>ab</sup> ± 0.021
全氮/%	0.560 <sup>a</sup> ± 0.061	0.536 <sup>ab</sup> ± 0.047	0.480 <sup>b</sup> ± 0.024	0.476 <sup>b</sup> ± 0.020
有机碳/% *	0.099 ± 0.012	0.090 ± 0.009	0.075 ± 0.003	0.078 ± 0.005
全硫/%	0.079 <sup>a</sup> ± 0.007	0.061 <sup>ab</sup> ± 0.008	0.058 <sup>ab</sup> ± 0.002	0.054 <sup>b</sup> ± 0.002
全磷/%	0.055 <sup>b</sup> ± 0.004	0.058 <sup>a</sup> ± 0.005	0.055 <sup>b</sup> ± 0.002	0.054 <sup>b</sup> ± 0.002

注: \* 表示 Kruskal Wallis 分析差异不显著,其他为单因素方差分析。

### 3.4 土壤养分和物种多样性的相关分析

Pearson 相关系数和 Spearman 相关系数及显著性检验结果(见表 6)表明:土壤 pH 值与全氮、全硫、有机碳呈显著负相关,全氮与有机碳、全硫、全磷呈显著正相关,有机碳与全硫以及全硫与全磷呈显

表 4 不同海拔梯度间群落物种组成相似系数

海拔梯度/m	2 350	2 300	2 250	2 200
海拔 2 350 m	1.000 0	0.291 7	0.387 8	0.348 8
海拔 2 300 m	0.451 6	1.000 0	0.377 8	0.405 4
海拔 2 250 m	0.558 8	0.548 3	1.000 0	0.450 0
海拔 2 200 m	0.517 2	0.576 9	0.620 7	1.000 0

注:以对角线为界,右上为  $C_{ij}$  计算方法所得的数据,左下为  $I_{ij}$  计算方法所得的数据。

### 3.3 土壤理化性质在不同海拔梯度间的差异

土壤养分的方差分析结果表明:4 个海拔梯度的样地土壤都呈现弱酸性,土壤 pH 值和土壤全磷在不同海拔的样地内差异显著,但随海拔变化土壤 pH 值和土壤全磷变化不规律;土壤全氮、全硫含量的变化随海拔值减小而减小,且土壤全氮、全硫在海拔 2 350 m 处样地内的含量显著高于海拔 2 250 m 和 2 200 m 处样地内的,这说明海拔高的林线森林表层积累的土壤氮、硫较多。非参数 Kruskal Wallis 的检验有机碳含量在 4 个不同海拔样地间差异不显著,但其均值随海拔降低而减小,高海拔地区表层有机碳积累较多(见表 5)。

著正相关;Simpson 指数与 Shannon-Weaner 指数,Shannon-Weaner 指数和 Patrick 丰富度指数呈显著正相关;除 Spearman 秩相关显示 Simpson 指数和全磷有显著微弱负相关外,多样性指数和土壤理化性质没有显著相关。

表 6 物种多样性指数和土壤理化性质的相关系数

	土壤 pH 值	全氮	有机碳	全硫	全磷	Simpson	Shannon-Weaner	Pielou	Patrick
土壤 pH 值	1.00	-0.67 ***	-0.60 ***	-0.52 **	-0.35 *	0.08	0.12	0.10	0.11
全氮	-0.66 ***	1.00	0.89 ***	0.76 ***	0.64 ***	0.08	0.18	0.07	0.04
有机碳	-0.64 ***	0.93 ***	1.00	0.66 ***	0.35	0.01	0.12	-0.03	0.08
全硫	-0.51 **	0.72 ***	0.65 ***	1.00	0.57 ***	0.02	0.22	0.23	-0.08
全磷	-0.33	0.68 ***	0.58 ***	0.58 ***	1.00	-0.09	-0.10	0.02	0.01
Simpson	0.08	0.26	0.19	0.20	-0.04 ***	1.00	0.51 **	0.10	0.29
Shannon-Weaner	0.09	0.25	0.20	0.24	-0.07	0.93 ***	1.00	0.35	0.52 **
Pielou	0.06	0.22	0.14	0.31	0.11	0.49 **	0.51 **	1.00	-0.40 *
Patrick	0.06	0.07	0.09	-0.05	0.03	0.46 **	0.46 **	-0.25	1.00

注: \* 表示  $P < 0.05$  呈显著相关; \*\* 表示  $P < 0.01$  呈非常显著相关; \*\*\* 表示  $P < 0.001$  呈极非常显著相关。以对角线为界,右上是 Pearson 相关,左下是 Spearman 秩相关。



## 4 讨论

### 4.1 不同海拔梯度下林线森林斑块内草本群落特征

本文调查的不同海拔林线林下出现的草本种类为21科45属.由于多样性指数的计算方法各异,因此用多个指数处理数据可以反映更真实的结果<sup>[15]</sup>.针对敏感生境林线森林的海拔值从2 200 m增大到2 350 m,Patrick 丰富度指数、Shannon-Weaner 指数、Pielou 均匀性指数的单因素方差和非参数秩和检验的Simpson 指数分析结果均表明不同海拔梯度的林下草本物种多样性差异不显著,但多样性指数在海拔2 350 m处最大,且呈随海拔值的减小而减小的趋势.金慧等<sup>[30]</sup>对长白山牛皮杜鹃群落随海拔梯度变化研究也证明草本层的 $\alpha$ 多样性指数在海拔2 350 m处达最大值.

草本群落相似性在不同海拔梯度的样地间有显著的差别,且构成物种也有差异,海拔是造成群落差异性的主要原因.随海拔减小样地内独有物种数量也减少,且相邻海拔梯度的共有物种数量也较少.参照不同林型和不同恢复进程的林下草本植物相关研究均表明:草本植物在不同环境下持续性较差,且草本植物随着环境条件的改变而出现较大的波动性<sup>[15,17,31]</sup>.沿海拔梯度草本植物的替换速率比灌木物种的替换速率更高<sup>[30]</sup>.本文草本物种组成相似系数 $C_j$ 值小于0.5和 $I_j$ 值小于0.6,这和上述结果相类似.群落相似性的计算采用了样地内每个物种的重要值,这可以反映物种地位的变化,而群落物种组成相似性采用了样地内物种丰富度来反映物种组成变化.对海拔2 200 m与2 250 m样地的群落相似性和群落物种组成相似性分析发现:物种组成相似性最大且群落相似性中等,据此推测海拔2 200 ~ 2 250 m区间内物种组成变化较少而物种重要值(地位)有明显变化.对海拔2 300 m与2 250 m以及海拔2 300 m与2 200 m样地的群落相似性和群落物种组成相似性分析发现:海拔2 300 m样地与2 250 m样地的群落组成相似中等,但海拔2 300 m样地与海拔2 200 m样地的群落组成相似性较大,据此推测在海拔2 250 ~ 2 300 m范围内的物种组成发生变化较大.对海拔2 300 m和2 350 m样地的群落相似性和群落物种组成相似性分析发现:物种组成相似性和群落相似性都最小,这说明在海拔2 300 m以上的物种组成差别较大,群落相似性也较大.

人工造林在海拔2 300 m以上不易成活<sup>[32]</sup>,但本文研究结果显示林下草本植物在海拔2 350 m处群落总丰富度和物种多样性较高,据此推测林线林

下草本的生长对乔木幼苗也会产生竞争作用<sup>[13]</sup>.

### 4.2 不同海拔梯度下林线森林斑块内表层土壤理化性质的差异

单因素方差分析结果表明:土壤pH值随海拔梯度变化不规律,但土壤全氮和全硫含量随海拔值升高而递增,全磷含量在海拔2 300 ~ 2 350 m内的变化略有差异,但仍表现为在高海拔处的全磷含量大于在低海拔处的全磷含量;秩和检验的结果表明:不同海拔梯度有机碳差异不显著,但有机碳的均值随海拔梯度变化的趋势与全氮和全硫的变化趋势相同,高海拔和低海拔之间有显著差异.多位学者研究表明:全氮和全磷常表现较一致的变化趋势<sup>[16,33-34]</sup>.土壤氮和磷是大量元素之一,可作为土壤肥力的代表,表层土壤的肥力促进草本层生长发育<sup>[35]</sup>.从多重比较发现较高海拔会有较大的表层肥力,但物种多样性在不同海拔样地内差异不显著,这说明:在研究范围内,海拔差异不是限制林下草本植物生长发育的主要因素.土壤表层pH值变动不规律的原因可能与地表活动较活跃(如降雨和牲畜活动)有关.土壤硫在研究区域内的含量较高的原因可能与该地区附近有矿区分布有关.

### 4.3 草本多样性指数和土壤理化性质的相关关系

土壤表层的pH值与全氮和有机碳呈极非常显著负相关,与全磷呈显著负相关,这说明土壤表层的酸度在合理变化范围内有利于土壤表层阳离子的释放.林毅等<sup>[36]</sup>对烟区土壤研究发现土壤pH值与碱解N、速效K、交换性Ca、交换性Mg、有效Zn、水溶性B和活性Mn有非常显著的正相关,但正相关系数值均小于0.5,这说明林线林下草本与烟草生长所需土壤pH值相差较大.土壤表层全氮与有机碳、全磷、全硫呈极非常显著正相关,这可能是因为林线森林的凋落物不断积累,在草食动物帮助下凋落物的分解和养分释放丰富了土壤的有机质和其他养分的含量<sup>[37]</sup>.文献<sup>[38]</sup>研究证明土壤肥力对植物多样性有影响,但本研究发现林线森林的土壤养分对草本植物多样性没有显著的影响,这与文献<sup>[16]</sup>的研究结果一致,即林线森林的林下草本层与土壤养分无显著相关关系.

## 5 结论

本文选取人工林林线斑块内的草本层和表层土壤为研究对象,对草本的多样性和土壤理化性质进行研究,发现:(i)草本物种多样性随海拔变化不显

著,但草本群落相似性差异较大,并在不同海拔的林线斑块中呈不规则的波动变化.在高海拔林线斑块内草本群落丰富度较大且独有物种数量较多.在海拔2 300 m以上的林线斑块内草本物种变化较大.

(ii)随海拔值增大,在土壤养分中的全氮、全硫和全磷含量均增大,pH 值呈波动变化.土壤养分在不同海拔间变化趋势可能与牲畜活动、气候等因素有关.

(iii)土壤养分(全氮、全磷、全硫、有机碳)之间呈显著正相关,pH 值与其他养分呈显著负相关,土壤养分与草本多样性无显著相关.在林线森林斑块内土壤养分间及它们与植物多样性的相关关系与其他研究区差别较大.

## 6 参考文献

- [1] HARSCH M A, HUMLME P E, MCGLONE M S, et al. Are treelines advancing? a global meta-analysis of treeline response to climate warming [J]. *Ecology Letters*, 2009, 12(10): 1040-1049.
- [2] 方近圻, 吴宁, 罗鹏, 等. 干扰对高山林线再形成过程的影响 [J]. *生态学杂志*, 2005, 24(12): 1493-1498.
- [3] DAWES M A, HÄTTENSCHWILER S, BEBI P, et al. Species-specific tree growth responses to 9 years of CO<sub>2</sub> enrichment at the alpine treeline [J]. *Journal of Ecology*, 2011, 99(2): 383-394.
- [4] D'ARRIGO R, JACOBY G, BUCKLEY B, et al. Tree growth and inferred temperature variability at the North American Arctic treeline [J]. *Global and Planetary Change*, 2009, 65(1/2): 71-82.
- [5] SPEED J D M, AUSTRHEIM G, HESTER A J, et al. Experimental evidence for herbivore limitation of the treeline [J]. *Ecology*, 2010, 91(11): 3414-3420.
- [6] BHARTI R R, ADHIKARI B S, RAWAT G S. Assessing vegetation changes in timberline ecotone of Nanda Devi National Park, Uttarakhand [J]. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2012, 18: 472-479.
- [7] HUGHES N M, JOHNSON D M, AKHALKATSI M, et al. Characterizing *Betula litwinowii* seedling microsites at the alpine-treeline ecotone, Central Greater Caucasus Mountains, Georgia [J]. *Arctic, Antarctic and Alpine Research*, 2009, 41(1): 112-118.
- [8] ANSCHLAG K, BROLL G, HOLTMEIER F K. Mountain birch seedlings in the treeline ecotone, subarctic Finland: variation in above- and below-ground growth depending on microtopography [J]. *Arctic, Antarctic and Alpine Research*, 2008, 40(4): 609-616.
- [9] PEREG D, PAYETTE S. Development of black spruce growth forms at treeline [J]. *Plant Ecology*, 1998, 138(2): 137-147.
- [10] 牛莉芹, 程占红. 五台山森林群落中物种多样性对旅游干扰的生态响应 [J]. *水土保持研究*, 2012, 19(4): 106-111.
- [11] SPEED J D M, AUSTRHEIM G, HESTER A J, et al. Growth limitation of mountain birch caused by sheep browsing at the altitudinal treeline [J]. *Forest Ecology and Management*, 2011, 261(7): 1344-1352.
- [12] GILLIAM F S. The ecological significance of the herbaceous layer in temperate forest ecosystems [J]. *BioScience*, 2007, 57(10): 845-858.
- [13] DULLINGER S, DIRNBÖCK T, GRABHERR G. Modelling climate change-driven treeline shifts: relative effects of temperature increase, dispersal and invasibility [J]. *Journal of Ecology*, 2004, 92(2): 241-252.
- [14] BEAUREGARD F, DE BLOIS S. Rapid latitudinal range expansion at cold limits unlikely for temperate understory forest plants [J]. *Ecosphere*, 2016, 7(11): e01549.
- [15] 崔宁洁, 陈小红, 刘洋, 等. 不同林龄马尾松人工林林下灌木和草本多样性 [J]. *生态学报*, 2014, 34(15): 4313-4323.
- [16] 崔宁洁, 张丹桔, 刘洋, 等. 不同林龄马尾松人工林林下植物多样性与土壤理化性质 [J]. *生态学杂志*, 2014, 33(10): 2610-2617.
- [17] 吴彦, 刘庆, 何海, 等. 亚高山针叶林人工恢复过程中物种多样性变化 [J]. *应用生态学报*, 2004, 15(8): 1301-1306.
- [18] 潘红丽, 李迈和, 蔡小虎, 等. 海拔梯度上的植物生长与生理生态特性 [J]. *生态环境学报*, 2009, 18(2): 722-730.
- [19] 刘鸿雁, 曹艳丽, 田军, 等. 山西五台山高山林线的植被景观 [J]. *植物生态学报*, 2003, 27(2): 263-269.
- [20] RODRÍGUEZ-LLERENA V M, DAMIÁN-CARRIÓN D A, SANTILLÁN-LIMA P G, et al. Forest biodiversity in Andean brow and its relation to the carbon content in the above-ground biomass [J]. *Acta Agronómica*, 2017, 66(1): 35-41.
- [21] 漆良华, 彭镇华, 张旭东, 等. 退化土地植被恢复群落物种多样性与生物量分配格局 [J]. *生态学杂志*, 2007, 26(11): 1697-1702.
- [22] LIU Hongyan, TANG Zhiyao, DAI Junhu, et al. Larch timberline and its development in North China [J]. *Mountain Research and Development*, 2002, 22(4): 359-367.
- [23] NILSSON M C, WARDLE D A. Understory vegetation as a forest ecosystem driver: evidence from the northern Swedish boreal forest [J]. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 2005, 3(8): 421-428.
- [24] LOMOLINO M V. Elevation gradients of species-density: historical and prospective views [J]. *Global Ecology and Biogeography*, 2001, 10(1): 3-13.



- [25] 崔本义,朱世忠,曳红玉. 五台山植物资源 [M]. 太原:山西科学技术出版社,2011:3-10.
- [26] 刘秀丽,张勃,任媛,等. 五台山地区草地生态系统服务价值估算 [J]. 干旱区资源与环境,2015,29(5):24-29.
- [27] 张金屯. 数量生态学 [M]. 2版. 北京:科学出版社,2011:1-500.
- [28] HUDSON J M G, HENRY G H R. Increased plant biomass in a high arctic heath community from 1981 to 2008 [J]. Ecology, 2009, 90(10):2657-2663.
- [29] ANDERSON M J. A new method for non-parametric multivariate analysis of variance [J]. Austral Ecology, 2001, 26(1):32-46.
- [30] 金慧,赵莹,赵伟,等. 长白山牛皮杜鹃群落物种多样性的海拔梯度变化及相似性 [J]. 生态学报, 2015, 35(1):125-133.
- [31] 胡相明,程积民,万惠娥. 黄土丘陵区人工林下草本层植物的结构特征 [J]. 水土保持通报,2006,26(3):41-45.
- [32] HOLTMEIER F K, BROLL G. Sensitivity and response of northern hemisphere altitudinal and polar treelines to environmental change at landscape and local scales [J]. Global Ecology and Biogeography, 2005, 14(5):395-410.
- [33] 葛晓改,黄志霖,程瑞梅,等. 三峡库区马尾松人工林凋落物和根系输入对土壤理化性质的影响 [J]. 应用生态学报,2012,23(12):3301-3308.
- [34] 郭泉水,康义,赵玉娟,等. 三峡库区消落带土壤氮磷钾、pH值和有机质变化 [J]. 林业科学,2012,48(3):7-10.
- [35] 李志安,邹碧,丁永祯,等. 植物残茬对土壤酸度的影响及其作用机理 [J]. 生态学报,2005,25(9):2382-2388.
- [36] 林毅,梁颂捷,朱其清. 三明烟区土壤pH值与土壤有效养分的相关性 [J]. 烟草科技,2003,36(6):35-37.
- [37] 赵成章,石福习,董小刚,等. 祁连山北坡退化林地植被群落的自然恢复过程及土壤特征变化 [J]. 生态学报, 2011, 31(1):115-122.
- [38] 杨小波,张桃林,吴庆书. 海南琼北地区不同植被类型物种多样性与土壤肥力的关系 [J]. 生态学报,2002, 22(2):190-196.

## The Understory Herbage Community and Surface Soil Characters at Different Altitudes of Treeline Forest Patch in Wutai Mountain

JIA Meiyu<sup>1</sup>, ZHANG Jintun<sup>2\*</sup>, SONG Zhenhui<sup>1</sup>, LIANG Yu<sup>2</sup>, ZHANG Youqian<sup>1</sup>

(1. School of Water Resources and Environmental Engineering, East China University of Technology, Nanchang Jiangxi 330013, China;

2. College of Life Science, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

**Abstract:** The four altitudes (2 200 m, 2 250 m, 2 300 m, 2 350 m) are selected as sites at treeline patch, the herbage and surface soil (0—10 cm) are investigated and indoor experiment is made. Indexes, one-way ANOVA, PERMANOVA, PCoA, and Pearson correlation and Spearman rank correlation coefficients are used for analysis. The results are as follows. (i) Species diversity has no significant difference between sites, but herbage community is significantly affected by altitude. Comparing herbage communities in site with 2 350 m and 2 300 m, it shows that they have both minimal of community component similarity and community similarity, it has experienced greatest community difference from 2 300 m to 2 350 m. While comparing two sites with 2 250 m and 2 200 m, community component similarity is greatest and medium of community similarity, it means that important values of species change more than community component from 2 200 m to 2 250 m. (ii) One-way ANOVA analysis shows that surface soil pH, total nitrogen, total phosphorus and total sulfur have significant difference between sites, Kruskal Wallis rank sum test shows that soil organic carbon have no significant difference between sites, and total nitrogen, total sulfur and organic carbon increase with altitude getting higher. (iii) Considering results from Pearson and Spearman correlation coefficients, it shows that soil pH has negative correlation with total nitrogen, total phosphorus and total sulfur and organic carbon in surface soil, most of correlation between total nitrogen, total phosphorus, total sulfur and organic carbon are positive, these soil properties have no significant with species diversity. It is found that understory herbage community in treeline forest patch fluctuates and is affected with altitude, not soil properties, the reason may be from grazing and other environmental conditions, more strict experiment shall be set for deep research.

**Key words:** altitude gradient; treeline forest; understory herbage; species diversity; community similarity; soil physical and chemical properties

(责任编辑:刘显亮)