

基于灰色关联度分析的森林景观类型环境耦合度研究

周国强,陈彩虹*,薛 轶,杜缘缘

(中南林业科技大学,湖南 长沙 410000)

摘 要:以新化县大熊山国有林场的杉木林、松林和阔叶林 3 种森林景观类型为研究对象,采用灰色关联度法分析研究区 3 种森林景观类型的平均胸径、平均树高、灌木层多样性和草本层多样性与 6 个环境因子之间的关联程度,并构建环境耦合度模型,探究林场森林景观类型相互作用下的稳定性。结果表明,1)3 种森林景观类型对研究区的环境因子具备较高的适宜性;2)以年均温度和年降水量为代表的气候因子对森林生长发育的关联程度最高,其次是土壤因子,而影响最小的则是地形因子;3)3 种森林景观类型中阔叶林和杉木林相互作用的稳定程度最高,其次是阔叶林和松林之间的相互作用,最后则是杉木林和松林。

关键词:森林景观类型;环境因子;灰色关联度法;环境耦合度

中图分类号:TU985 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-7461(2018)02-0219-05

Coupling Degree of Forest Landscape Type Environment Based on Gray Relational Grade Analysis

ZHOU Guo-qiang, CHEN Cai-hong*, XUE Yi, DU Yuan-yuan

(Central South University of Forestry and Technology, Changsha, Hunan 410000, China)

Abstract: Taking the three forest landscape types, i. e. *Cunninghamia lanceolata*, *Pinus tabulaeformis* and broad-leaved forest in the state-owned forest farmland of Xinhua County as research objects, the correlation between the tree parameters (the average diameter, tree height, diversity of bush layer, and diversity of herbal layer) of the three forest landscape types and six environmental factors was analyzed by gray correlation method. An environmental coupling model was established to explore the stability of forest landscape type interaction. The results showed that 1) the three forest landscape types involved in the study had high suitability for the environmental factors in the study area. 2) Climatic factors, particularly annual average temperature and annual precipitation, exhibited the highest degree of relationship with the growth and development of forest, followed by soil factor, and terrain factor. 3) The interaction between broad-leaved forest and *C. lanceolata* forest was the highest among the three forest landscape types, followed by the interaction between broad-leaved forest and pine forest, then the interaction between the fir forest and pine forest.

Key words: forest landscape; environmental factor; gray relational degree method; environmental coupling degree

环境对植物的分布和影响对生态学的研究意义重大^[1-2]。近年来,生态学家们对决定物种分布和生长以及多样性因子的探索从未间断,众多研究结果表明气候特征、土壤状况和地形因素对物种的分布

和多样性影响巨大^[3-4]。任敏学^[5]等通过对太白山巴山冷杉-糙皮桦混交林及其环境因子采用 CCA 排序法分析得出,土壤 pH、海拔、岩石盖度对物种分布有显著影响。

收稿日期:2017-05-15 修回日期:2017-08-11

基金项目:湖南省教育厅重点项目(12A100);湖南省“十二五”重点学科-森林经理(034-0014)。

作者简介:周国强,男,在读硕士,研究方向:林业信息系统工程。E-mail:550807890@qq.com

* 通信作者:陈彩虹,女,博士,教授,研究方向:森林资源管理。E-mail:chencaihong056@163.com

耦合度是描述系统或要素之间相互影响的程度^[5]。耦合作用及其协调程度决定了系统由无序走向有序的发展趋势^[7]。耦合关系在物理学领域研究较多,但随着各种学科之间的交叉发展,不同系统间的耦合作用也广泛应用在社会、经济等不同领域^[8]。其中,李际平^[9]等借鉴生态系统的生态位提出森林景观类型环境耦合度,利用耦合度大小反映森林景观类型两两之间在同一环境条件下共生稳定的状态,首次在景观层次上提出不同森林景观类型间通过对利用环境资源时的相互作用特性,揭示了森林异质性景观的稳定机制^[10],体现了特定区域下森林景观类型在生态环境中的位置和功能关系。

灰色关联度分析是灰色理论中衡量因素间关联程度的一种方法^[11]。自邓聚龙^[12]提出基于相似性原理的灰色关联分析法以来,该方法在各个领域得到了广泛应用^[13-14],黄涛^[15]在2016年用灰色关联分析解决了模糊多属性(群)的决策问题,并通过算例分析说明该方法的简明高效。但灰色关联度在森林景观类型林分属性与环境之间的研究则鲜有报道。因此,笔者通过灰色关联度法对不同森林景观类型的林分因子和研究区的环境因子进行分析,并结合森林景观类型间环境耦合度的构建,为大熊山国有林场的森林景观类型稳定性建设提供理论基础和技术支撑。

1 研究区概况

大熊山国有林场位于湖南湘中娄底市新化县境西北部,其经纬跨度为111°18′40″—111°19′16″E, 28°07′57″—28°08′14″N,属雪峰山脉北段中山地貌,海拔270~1 622 m,坡度10°~65°。主要成土母岩为板页岩,土壤以板发育而成的山地黄壤为主。属亚热带季风风湿润气候区,年平均气温15℃,年降水量1 560 mm,无霜期220 d左右。林场经营面积7 623 hm²,有林地7 453.3 hm²,划定生态公益林6 464.6 hm²,其中国家级533.3 hm²,省级5 931.3 hm²;拥有森林蓄积量38×10⁴ m³。其中商品林蓄积2×10⁴ m³,生态公益林蓄积36×10⁴ m³,林分类型以杉木人工林(*Cunninghamia lanceolata*)、马尾松人工林(*Pinus massoniana*)和常绿阔叶林为主,灌木以继木(*Loropetalum chinensis*)、刺楸(*Kalopanax septemlobus*)、野桐(*Mallotus japonicus*)、盐肤木(*Rhus chinensis*)、映山红(*Rhododendron simsii*)、乌饭(*Vaccinium bracteatum*)、漆树(*Toxicodendron vernicifluum*)、白栎(*Quercus fabri*)为主,草本以蕨(*P. aquilinum*)、白叶莓(*Rubus innotatus*)、蛇葡萄(*Ampelopsis sinica*)、芒(*Miscanthus*

sinensis)和荩草(*Arthraxon hispidus*)等为主,林场分类属以保护为主的生态公益型林场。探究大熊山国有林场3种森林景观类型与环境耦合度之间的关系,构建森林景观类型间的环境耦合度模型,为提高森林景观类型稳定性提供参考,以期最大限度地发挥林场的生态保护作用。

2 材料与方法

2.1 数据来源

于2016年6月14日至2016年7月8日在新化县大熊山国有林场对杉木林、松林和阔叶林3种森林景观类型进行外业调查,其中每种森林景观类型设置12块20 m×20 m样地,共计36块样地,实测每块样地中林木的胸径和树高以及海拔、坡向、坡度、坡位、土层厚度和土壤类型等环境因子。同时采用五点取样法在每个样地四角和中心地带设置5个5 m×5 m灌木调查样方和5个1 m×1 m的草本调查样方,调查灌木层和草本层的物种名称、高度、盖度、株(丛)数等因子。结合2014—2016年的气象数据,选取大熊山国有林场3种森林景观类型环境因子中的地形因子、气候因子和土壤因子作为评价森林景观类型环境适宜性的指标,为了便于统计地形因子选择海拔和坡度(坡向和坡位等地形因子在特定范围内异质性太强,不便统计)作为评价指标,气候因子选年均温度和年降水量,土壤因子则选土壤类型和土层厚度。

2.2 数据处理

参照李际平^[9]在森林景观类型环境耦合度模型的构建与应用中归纳出的杉木林、阔叶林和松林的环境因子适宜性指标(表1),统计出大熊山国有林场中3种森林景观类型相对应的环境因子适宜性指标(表2),统计每块样地的平均胸径和平均树高,并采用Simpson多样性指数计算出每块样地的灌木层多样性和草本层多样性。

2.3 研究方法

2.3.1 环境适宜性表达 根据模糊数学规则,森林景观类型对环境因子的适宜函数为 $X=f(B_{ki})$, $X\in[0,1]$ 。实际计算中,景观k相对环境因子i的适宜值为区间分布 $[B'_{ki}, B''_{ki}]$ 时,若 $B\in[B'_{ki}, B''_{ki}]$,对于任意 $B\in[\min B_{ki}, \max B_{ki}]$,即 X_{ki} 为1,若存在 $B\notin[\min B_{ki}, \max B_{ki}]$,即 X_{ki} 为0。

$$X_{ki} = \begin{cases} 1, & \text{当 } \min B_{i\text{opt}} \leq B_{ki} \leq \max B_{i\text{opt}} \\ \frac{B_{ki} - \min B_{is}}{\max B_{i\text{opt}} - \min B_{i\text{opt}}}, & \text{当 } \min B_{i\text{opt}} \leq B_{ki} \leq \max B_{is} \\ 0, & \text{当 } B_{ki} < \min B_{is} \text{ 或 } B_{ki} > \max B_{is} \end{cases} \quad (1)$$

式中, $[\min B_{\text{iopt}}, \max B_{\text{iopt}}]$ 为景观 k 相对环境因子 i 的最适区间, $[\min B_{\text{is}}, \max B_{\text{is}}]$ 为景观 k 相对环境因子 i 的相对适宜区间。

2.3.2 灰色关联度分析 将外业调查的森林景观类型小班林分属性(平均胸径、平均树高、灌木层多

样性和草本层多样性)与环境因子视为灰色系统。为了进行关联分析,根据 3 种林分的土壤生态适应性,用 10、9、8 分别对应山地黄壤、山地黄棕壤和红壤坡。并对所有的林分属性和环境因子的数据进行标准化处理。

表 1 森林景观类型环境适宜性

Table 1 Forest landscape type environmental suitability

森林景观类型	地形		气候		土壤	
	海拔/m	坡度/(°)	温度/℃	年降水量/mm	类型	土层厚度
杉木林	≤1 000	0~45	15~23,1 月均温>1	800~2 000,且排水良好	红壤、红黄壤、黄壤(最佳)	土层深厚,质地疏松,肥沃湿润
松林	≤1 500	0~45	13~22,最低温度>-15	>800	要求不严	土层中等或深厚
阔叶林	要求不严	0~45	>16,1 月均温>5	>1 000	红壤、红黄壤、黄壤及冲积土壤	土层深厚

表 2 大熊山国有林场森林景观类型环境适宜性

Table 2 Forest landscape type environmental suitability for Daxiong Mountain

森林景观类型	地形		气候		土壤	
	海拔/m	坡度/(°)	年均温度/℃	年降水量/mm	类型	土层厚度
杉木林	400~1 200	10~55	14.5~15.5	1 500~1 600	山地黄壤	中等偏厚
松林	400~1 300	10~50	14.5~15.5	1 500~1 600	山地黄壤	中等偏厚
阔叶林	500~1 300	10~55	14.5~15.5	1 500~1 600	山地黄壤	中等偏厚

研究以外业调查所获取每个森林景观类型小班林分经标准化处理后的平均胸径、平均树高、林下灌木层与草本层物种多样性 4 个林分因子参数作为参考数列 S_n ;将地形因子、气候因子和土壤因子所对应的 6 个环境因子参数作为比较数列 S_i 进行关联分析,关联分析公式如下:

$$\epsilon_i(k)=\frac{\Delta\min+\rho\Delta\max}{|S_n(k)-S_i(k)|+\rho\Delta\max}\tag{2}$$

$$r_i=\frac{1}{n}\sum_{k=1}^n\epsilon_i(k)\tag{3}$$

式中, $\Delta\min$ 和 $\Delta\max$ 分别表示所有比较序列绝对差

$$\lambda_{i(A,B)}=\begin{cases}\frac{\min[X_{Ai}\cdot r_{Ai},X_{Bi}\cdot r_{Bi}]}{\max[X_{Ai}\cdot r_{Ai},X_{Bi}\cdot r_{Bi}]},\text{当}\min[X_{Ai},X_{Bi}]\leqslant 0.5\text{时}\\1-\frac{\min[X_{Ai}\cdot r_{Ai},X_{Bi}\cdot r_{Bi}]}{\max[X_{Ai}\cdot r_{Ai},X_{Bi}\cdot r_{Bi}]},\text{当}\min[X_{Ai},X_{Bi}]>0.5\text{时}\end{cases}\tag{4}$$

式中, r_i 为环境因子与森林景观类型林分属性的关联程度。

森林景观类型之间对环境的耦合度是各环境因子相似程度的综合结果,参照李际平提出两个森林景观类型间环境耦合度综合评价模型可以得出:单个因子的耦合度产生的效应是一种非线性的乘积效应,计算 2 个景观 A 与 B 的环境耦合度时,将所有环境因子 $i(i=1,2,\cdots,n)$ 作为 n 维空间上的一点 $\lambda_i(A,B)$,计算出 n 维状态空间中点到坐标原点的加权距离 C_{fl} ,作为森林景观类型两两之间的环境耦合度的综合评价模型,公式如下:

值中最小值和最大值; ρ 为分辨系数,一般取 0.5,主要是为了提高显著性差异。将各因子同等重要计算等权关联度 r_i ,并将关联序列从大到小排列,确定各因子对边缘效应强度的影响程度。

2.3.3 环境耦合度模型构建 森林景观类型对不同的环境存在的不同适宜性,根据高斯定理,若 K 为 A 与 B 时, X_{Ai} 、 X_{Bi} 为森林景观类型 A 与 B 对环境因子 i 的适宜度,可定义 2 种景观类型 A 与 B 的单因子环境耦合度为:

$$C_{fl}=\sqrt{\sum_{i=1}^nW_i\lambda_i^2(A,B)}\tag{5}$$

式中, W_i 为景观类型结构修正参数。

3 结果与分析

3.1 3 种森林景观类型对环境因子的适宜性分析

将表 1 和表 2 的数据带入式(1),计算出研究区 3 种森林景观类型对环境因子的适宜度(表 3)。

研究区森林景观类型对年降水量、土壤类型、土层厚度(杉木林除外)和海拔(杉木林除外)的适宜性都基本处于最适范围;3 种森林景观类型对坡度也存在较强的适宜性,但对年均温度的适宜性则是一

般。表明了研究区的月均温度差异较大,基本能满足 3 种森林景观类型适宜温度的时间需求。3 种森林景观类型能很好的适应研究区的海拔因素、土壤因素和年均降水量,这为 3 种林分的生长发育提供了良好的环境基础。

表 3 3 种森林景观类型对环境因子的适宜程度

Table 3 Three forest landscape on the suitability of environmental factors

森林景观类型	地形		气候		土壤	
	海拔	坡度	年均温度	年降水量	土壤类型	土层厚度
杉木林	0.78	0.74	0.63	1.00	1.00	0.50
松林	1.00	0.82	0.71	1.00	1.00	1.00
阔叶林	1.00	0.74	0.66	1.00	1.00	1.00

表 4 杉木林环境因子与林分属性关联分析

Table 4 Correlation analysis of environmental factors and forest attributes of Chinesefir

森林景观类型	地形		气候		土壤	
	海拔	坡度	年均温度	年降水量	土壤类型	土层厚度
平均胸径	0.901 6	0.581 8	0.775 8	0.775 8	0.627 6	0.710 0
平均树高	0.726 8	0.597 6	0.721 4	0.721 4	0.591 9	0.650 0
灌木层多样性	0.589 2	0.564 8	0.738 1	0.738 1	0.674 9	0.828 7
草本层多样性	0.640 8	0.540 8	0.750 8	0.750 8	0.660 7	0.676 0
均值	0.714 6	0.571 3	0.746 5	0.746 5	0.638 8	0.716 2

从表 4 可以看出,在杉木林景观类型小班对中,林分属性与环境因子的关联程度为年均温度=年降水量>土层厚度>海拔>土壤类型>坡度。由此可

3.2 3 种森林景观类型林分属性与环境因子的关联度分析

根据式(2)和式(3),用 MATLAB7.0 计算出 3 种森林景观类型的林分属性与环境因子的关联度(表 4~表 6)。

发现,气候因素是影响杉木林林分各属性因子的主要原因,其次是土壤因素中的土层厚度和地形因素中的海拔,最后才是土壤类型和坡度。

表 5 松林环境因子与林分属性关联分析

Table 5 Correlation analysis of environmental factors and forest attributes of pines

森林景观类型	地形		气候		土壤	
	海拔	坡度	年均温度	年降水量	土壤类型	土层厚度
平均胸径	0.674 3	0.677 8	0.741 1	0.741 1	0.691 0	0.644 3
平均树高	0.648 6	0.634 3	0.672 3	0.672 3	0.692 4	0.652 0
灌木层多样性	0.583 0	0.612 9	0.825 1	0.825 1	0.550 0	0.731 0
草本层多样性	0.671 9	0.713 3	0.857 9	0.857 9	0.706 1	0.687 6
均值	0.644 4	0.659 6	0.774 1	0.774 1	0.659 9	0.678 7

由表 5 可知,松林的林分属性与环境因子的关联程度为年均温度=年降水量>土层厚度>土壤类型>坡度>海拔。说明气候因素是影响松林林分各属性因子的主要原因,土壤因素和地形因素是次要原因,这也从侧面体现出了松林抗瘠薄的特性。

从表 6 的计算结果可知,阔叶林林分属性与环境因子的关联程度为土层厚度>年均温度=年降水量>海拔>土壤类型>坡度,说明土层厚度和气候因素对阔叶林的生长发育都具有重大作用,是影响阔叶林林分各属性因子的主要原因,而海拔、土壤土壤类型和坡度对林分生长状况的影响则相对较低。

综上所述,对 3 种林分各属性因子影响最大的是环境因子中的气候因子,这主要是因为气候是影响林分分布最重要的因素之一,尤其林分生长环境

的年均温度和年均降水量。其中,温度影响林木体内的各种酶活性,从而影响林木中的光合作用和呼吸作用,使整个林分生长发育过程中的各属性因子出现差异化表现。同时,水是植物生存最基本的物质之一,降水量能从根本上决定某种林分的分布范围,适宜的降水量维持是林分充分生长和空间结构稳定的重要原因。其次,土壤作为林分生长的载体,不同的土壤类型和土层厚度在一定程度上代表着林分生长潜力的差异。最后,地形因素会影响小范围内的气候特征,对林分的生长发育也具备一定的影响,但相比前两者而言,其对林分作用的程度稍低。

3.3 3 种森林景观类型环境耦合度分析

用 MATLAB7.0 将表 3 和表 4 的数据通过式(4)和式(5)计算得出 3 种森林景观类型的环境耦合

度值,计算结果见表 7。

环境耦合度所反映的是不同森林景观类型之间相互作用所形成的稳定程度,而不是单个森林景观类型对环境的适宜性强度。由表 7 可知,杉木林和阔叶林的环境耦合度值最大,其次是松林和阔叶林,杉木林和松林的环境耦合度值则是最小。说明 3 种森林景观类型中阔叶林和杉木林相互作用的稳定程度最高,其次是阔叶林和松林之间的相互作用,最后则是杉木林和松林。因此,在大熊山国有林场的环

表 6 阔叶林环境因子与林分属性关联分析

Table 6 Correlation analysis of environmental factors and forest attributes of broadleaf forest

森林景观类型	地形		气候		土壤	
	海拔	坡度	年均温度	年降水量	土壤类型	土层厚度
平均胸径	0.675 4	0.473 6	0.712 8	0.712 8	0.601 0	0.860 7
平均树高	0.690 3	0.577 5	0.724 4	0.724 4	0.688 4	0.794 5
灌木层多样性	0.704 6	0.502 0	0.760 4	0.760 4	0.703 9	0.799 8
草本层多样性	0.546 9	0.680 8	0.771 5	0.771 5	0.496 1	0.684 4
均值	0.654 3	0.558 5	0.742 3	0.742 3	0.622 4	0.784 9

表 7 3 种森林景观类型环境耦合度

Table 7 Three forest landscape environment coupling degree

	杉木林	松林	阔叶林
杉木林			
松林	0.693 7		
阔叶林	0.923 1	0.834 5	

4 结论与讨论

大熊山国有林场 3 种森林景观类型对研究区的环境因子具备较高的适宜性,杉木林、松林和阔叶林适合在研究区生长,但由于当地夏季和冬季的月均温度差异较大,尤其是冬季低温,对 3 种森林景观类型的年生长状况存在一定的限制作用,这从侧面反映出适宜的温度范围对森林的生长发育存有较大影响。

经灰色关联度法分析,大熊山国有林场中以年均温度和年降水量为代表的气候因子对森林生长发育的关联程度最高,其次是土壤因子,而影响最小的则是地形因子。但海拔对 3 种森林景观类型的发展有不小的影响,这是因为大熊山当地的气候与海拔存在较大的关联性。这一结论则正好与李际平^[9]在森林景观类型环境耦合度模型的构建与应用中选择最具代表性的生态适宜因子指标相印证,即气候特征与土壤状况是影响森林景观类型的主要因子。

在森林景观类型的林分属性和环境因子的环境耦合度计算公式中加入灰色关联度法权重,能增加计算结果的客观性。计算结果表明,大熊山国有林场 3 种森林景观类型中,阔叶林和杉木林相互作用的稳定程度最高,其次是阔叶林和松林之间的相互

境因子下,阔叶林景观与其他 2 种景观形成的景观镶嵌体是最稳定的。造成这一现象的原因可能是研究区的杉木林和松林同属针叶林,两者之间林分空间结构以及对环境资源的利用特征均存在较大的相似程度,进而对环境资源的竞争性较强,所形成的景观镶嵌结构稳定性相对有限。而针叶林与阔叶林构成的景观镶嵌体,两者因具备较大的空间结构差异,对环境资源的利用也存在互补效应,所形成的景观镶嵌结构稳定性相对较高。

作用,最后则是杉木林和松林。

在空间地域相邻的同一环境下,2 个森林景观类型之间因竞争环境资源所产生的作用程度为森林景观类型间的环境耦合度,它所反映的是不同森林景观类型间的相异和相似特性在同一环境条件下相互作用所表现出来的稳定程度。但区域中环境各个因子所构成的环境综合体存在较大的复杂性,尤其是当一个景观跨越一个渐变的环境梯度时(例如坡向与坡位因子的变化)这种复杂性更加明显,所以环境耦合模型的应用也存在相应的复杂性和局限性,如何更加清晰地表达出环境耦合模型的复杂性和突破模型应用的局限性将是本研究下一步需要解决的问题。此外,本文的研究成果仅适用与湖南省新化县大熊山国有林场及周边区域,对其他地域的相同林分是否还存在此种关系仍需实地验证。

参考文献:

[1] 卜文圣,臧润国,丁易,等.海南岛热带低地雨林群落水平植物功能性状与环境因子相关性随演替阶段的变化[J].生物多样性,2013,21(3):278-287.
BU W S, ZANG R G, DING Y, *et al.* Relationships between plant functional traits at the community level and environmental factors during succession in a tropical lowland rainforest on Hainan Island, South China[J]. Biodiversity Science, 2013, 21 (3):278-287. (in Chinese)
[2] 许涵,李意德,骆土寿,等.海南尖峰岭不同热带雨林类型与物种多样性变化关联的环境因子[J].植物生态学报,2013,37 (1):26-36.

33.
HUA J. Elementary analysis of tenoning & grooving machines for wood flooring[J]. China Wood-based Panels, 2005(6): 31-33. (in Chinese)

[6] SHU W. Analysis on production and market of flooring in Europe[J]. China Wood-Based Panels, 2014, 04: 38-41.

[7] 马岩. 中国数控木工机械的开发方向[J]. 林业机械与木工设备, 2007, 35(11): 4-10, 13.

[8] ZHENG C L, YAO Z. Mechanism-structure integrative optimal design on construction machinery[J]. Chinese Journal of Computational Mechanics, 2012, 29(1): 81-85.

[9] GAYEN, DEBABRATA. Finite element based vibration analysis of graded spinning shaft system[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, 2014, 228(18): 97-103.

[10] YANG X W, LI Y M. Structural topology optimization on dynamic compliance at resonance frequency in thermal environments [J]. Structural and Multidisciplinary Optimization, 2014, 49(1): 81-91

[11] 宿艳彩. 基于 ANSYS 软件的桥架结构参数化有限元分析[D]. 成都: 西南交通大学, 2006.

[12] 张兴朝. 基于有限元分析的模块化数控机床结构动态设计研究[D]. 天津: 天津大学, 2001.

[13] 马岩, 岳彩裙, 郝思明. 暗直榫欧式木窗专用数控机床主轴的有限元分析[J]. 西北林学院学报, 2014, 29(1): 185-187.

[14] XIAO L X, WU G Q, ZHANG X D, *et al.* Statics analysis on workbenches of three kinds of electromaglev linear feed unit [J]. Applied Mechanics and Materials, 2012, 189: 340-344.

[15] 宋明强, 沈隽. 有限元与 ANSYS 在家具结构分析中的应用[J]. 西北林学院学报, 2008, 23(1): 174-177.

[16] 吕艳红, 张远群. 有限元软件 ANSYS 在果木家具强度分析中的应用[J]. 西北林学院学报, 2012, 27(6): 181-184.

[17] 袁安富, 郑祺. 基于 ANSYS 的机床模态分析[J]. 电脑知识与技术, 2008(1): 177-180, 193.

(上接第 223 页)

[3] 任学敏, 杨改河, 王得祥, 等. 环境因子对巴山冷杉-糙皮桦混交林物种分布及多样性的影响[J]. 生态学报, 2012, 32(2): 605-613.

REN X M, YANG G H, WANG D X, *et al.* Effects of environmental factors on species distribution and diversity in an *Abies-fargesii*-*Betulautilis* mixed forest [J]. Acta Ecologica Sinica, 2012, 32(2): 605-613. (in Chinese)

[4] 吴喆滢, 赵从举, 徐文娴, 等. 幼龄桉树茎流特征及其对环境因子的响应[J]. 西北林学院学报, 2015, 30(5): 46-52.

WU Z Y, ZHAO C J, XU W X, *et al.* Characteristics of the sap flow rate of the young *Eucalyptus* and its response to environment [J]. Journal of Northwest Forestry University, 2015, 30(5): 46-52. (in Chinese)

[5] 任学敏, 杨改河, 朱雅, 等. 环境因子对太白山高山植被物种组成和丰富度的影响[J]. 生态学报, 2014, 34(23): 6993-7003.

REN X M, YANG G H, ZHU Y, *et al.* Effect of environmental variables on species composition and richness of alpine vegetation in Taibai Mountain [J]. Acta Ecologica Sinica, 2014, 34(23): 6993-7003. (in Chinese)

[6] 赵春燕, 李际平, 马文俊, 等. 顾及耦合作用的森林景观类型多尺度分类[J]. 林业科学, 2013, 49(11): 183-188.

ZHAO C Y, LI J P, MA W J, *et al.* Multi-scale forest landscape classification considering coupling effect [J]. Scientia Silvae Sinicae, 2013, 49(11): 183-188. (in Chinese)

[7] 袁晓红, 李际平, 赵春燕, 等. 基于灌木层植物多样性的森林景观类型斑块耦合网络研究[J]. 中国农学通报, 2012, 28(16): 82-88.

YUAN X H, LI J P, ZHAO C Y, *et al.* Research on the coupling network of forest landscape patches based on shrubs diversity [J]. China Agricultural Science, 2012, 28(16): 82-88. (in Chinese)

[8] 赵春燕. 森林景观类型斑块边缘效应和耦合机理研究[D]. 长沙: 中南林业科技大学, 2012.

[9] 李际平, 陈端吕. 森林景观类型环境耦合度模型的构建与应用[J]. 中南林业科技大学学报, 2008, 28(4): 67-71.

LI J P, CHEN D L. Construction and application of environment-based coupling degree model for forest landscape types [J]. Central South University of Forestry and Technology, 2008, 28(4): 67-71. (in Chinese)

[10] 陈端吕, 李际平, 陈哲夫. 森林景观类型“斑块耦合网络”视角下森林经营的思考[J]. 西北林学院学报, 2015, 30(5): 268-272.

CHEN D L, LI J P, CHEN Z F. Forestry management in perspective of coupling network of landscape patches [J]. Journal of Northwest Forestry University, 2015, 30(5): 268-272. (in Chinese)

[11] 耿志伟, 薛伟, 万雷. 基于灰色关联度分析的东北林区贮木场火险评价[J]. 森林工程, 2014, 30(4): 34-38.

[12] 邓聚龙. 灰色系统理论简介[J]. 内蒙古电力, 1993(3): 51-52.

[13] 蹇黎, 秦小军, 余丹凤, 等. 喀斯特山区野生燕麦农艺性状的主成分与灰色关联度分析[J]. 中国农学通报, 2013, 29(21): 57-60.

[14] 张宝东, 孙占祥, 白伟, 等. 基于灰色关联度分析的辽西地区典型种植模式评价[J]. 生态学杂志, 2010, 29(12): 2452-2456.

[15] 黄涛. 基于灰色关联度分析的模糊群决策方法研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2016.