

基于响应面模型的竹胶合板模板力学性能优化

喻云水¹ 贺微粒² 李立君¹ 赵仁杰¹

(1 中南林业科技大学材料科学与工程学院 2 湖南工业大学包装设计艺术学院)

摘要:为实现竹胶合板模板力学性能的优化,以竹胶合板模板纵、横方向的静曲强度和弹性模量作为力学性能优化评价的基本指标,运用正交试验与数值模拟相结合的方法,构建了竹胶合板模板工艺参数和力学性能指标的二次响应面模型。基于该响应面模型,利用 Pareto 遗传算法对竹胶合板模板力学性能进行多目标优化,获得了 10 个 Pareto 解。通过对 10 个 Pareto 解与初始值力学性能进行比较与分析,结果表明:纵向静曲强度平均提高了 12.80%;横向静曲强度平均提高了 14.75%;纵向弹性模量平均提高了 14.11%;横向弹性模量平均提高了 8.59%。

关键词:竹胶合板模板;响应面模型;Pareto 遗传算法;优化设计

中图分类号: S781.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-1522(2009)06-0103-05

YU Yun-shui¹; HE Wei-li²; LI Li-jun¹; ZHAO Ren-jie¹. **Optimal design of the mechanical properties of bamboo plywood form based on response surface model.** *Journal of Beijing Forestry University* (2009) 31 (6) 103-107 [Ch, 8 ref.]

¹ College of Materials Science and Engineering, Central South University of Forestry and Technology, Changsha, 410004, P. R. China;

² College of Packaging Design and Art, Hunan University of Technology, Zhuzhou City, 412000, P. R. China.

In order to realize the mechanical properties optimization of bamboo plywood form, the quadratic response surface model of process parameter and mechanical properties, i.e. modulus of rupture (*MOR*) and modulus of elasticity (*MOE*) in both parallel and perpendicular directions, of bamboo plywood form was set up using orthogonal experiment and numerical simulation. Based on the response surface model, multi-objective optimization of mechanical properties of bamboo plywood form was carried out by the Pareto genetic algorithm, and 10 Pareto solutions were obtained. Comparing the 10 Pareto solutions with the initial value mechanical properties, the results showed that the *MOR* values in parallel and perpendicular directions increased by 12.80% and 14.75%, respectively; while the *MOE* values increased by 14.11% and 8.59% respectively.

Key words bamboo plywood form; response surface model; genetic algorithm of Pareto; optimal design

在竹胶合板模板研究与生产中,我们不能从理论上推导出工艺参数与产品力学性能之间的数学关系。当用户要求某项或多项性能指标达到预定值时,其工艺参数需要调整。传统上都是依靠经验进行反复试验,直到达到目标为止,因此工作量大、盲目性大。如果能通过数值模拟方法,进行先知性的性能仿真,获得工艺参数,然后进行试验修正,从而可减少试验盲目性和工作量。响应面方法(RSM)是一种结合应用数学、统计分析和试验设计的技术,可探讨影响因素与试验指标之间的数学关系,能对所感兴趣的试验指标受多个因素的影响问题进行建模

和分析^[1]。本文以竹胶合板模板纵、横方向的静曲强度和弹性模量作为力学性能优化评价的基本指标,基于响应面方法建立竹胶合板模板工艺参数与力学性能之间的二次响应面模型作为预测模型。运用 Pareto 遗传算法对响应面模型函数进行多目标求解,得到 Pareto 解集,从而获得竹胶合板模板力学性能的优化设计参数。

1 材料与方法

1.1 材料

湖南桃江县某相同立地条件下选取直径 10~

收稿日期:2008-08-24

<http://www.bjfujournal.cn>, <http://journal.bjfu.edu.cn>

基金项目:国家星火计划项目(2002EA105013)、国家林业局科技推广项目(2000-2-51)、中南林业科技大学高层次人才引进基金项目。

第一作者:喻云水,教授,博士生导师。主要研究方向:竹材工业化利用。电话:0731-85623047 Email: yuyunshui@sina.com 地址:410004

长沙市韶山南路 498 号中南林业科技大学材料科学与工程学院

12 cm, 竹龄 4~5 年, 秆形较直的毛竹 (*Phyllostachys pubescens*) 80 根, 在竹秆基部 50 cm 以上分别截取 2.1 m 长的竹段 2 根, 标明其在竹秆中的部位和方向, 以便竹篾均匀混合, 改善随机分散竹篾在高度上的力学性能不均匀性。手工剖分成竹条后, 剖去竹青篾和竹黄篾, 再用剖篾机加工成厚度 0.6~0.8 mm、宽度 18 mm 的规格竹篾用于竹席编织, 竹席的幅面尺寸为 500 mm×500 mm。竹席编织是由人工来完成的, 采用挑二压二的方法编织^[2]。加工出厚度为 1.3~1.5 mm、宽度为 18 mm、长为 500 mm 的规格竹篾用于竹帘, 竹帘不编织, 用散篾组坯。

水溶性酚醛树脂胶黏剂: 固体含量 40.3%, 游离酚含量 1.43%, 可被溴化物含量 12.7%, 黏度 160 s(涂 4 杯, 20℃), pH 值 11。

1.2 设备

微机控制试验热压机: 型号 BY602×2/2, 幅面 500 mm×500 mm, 总压力 1 500 kN, 苏州新协力企业发展有限公司制造; 微机控制电子式木材万能力学试验机: 型号 MWD-50, 济南试验机厂制造; 电热恒温鼓风干燥箱: 型号 SKF-01, 湖北省黄石市医疗器械厂制造; 调温调湿箱: 型号 302A, 上海试验仪器总厂制造; 电子天平: 型号 PB3002-N, METTER TOLEDO。

1.3 试验设计

在竹胶合板模板工业化生产中, 板材制造所能控制的热压工艺参数有: 热压温度、热压时间和热压压力; 板坯所能控制的工艺参数有: 板坯结构、施胶量、含水率及其分布。由于板坯结构和含水率分布均为非连续变量, 因此不作为数学模型中的设计变量。同时考虑到用于指导生产的优化工艺参数易于在工业化生产中实现, 因此本论文仅取热压温度 (T)、热压时间 (t)、热压压力 (P)、施胶量 (G) 和板坯含水率 (W) 等工艺参数作为设计变量, 板坯结构固定为正交结构, 板坯含水率均匀分布。选取竹胶合板模板纵向静曲强度 (y_1)、横向静曲强度 (y_2)、纵向弹性模量 (y_3)、横向弹性模量 (y_4) 等力学性能指标作为设计目标^[3]。采用正交试验 $L_{25}(5^6)$ 设计, 正交试验设计因素与水平见表 1。根据试验设计的要求, 进行 25 次试验, 每次均进行平行试验, 共压制 50 块板材。为了解决不同量纲给建模带来的困难, 5 个试验因素的水平值分别按 $x_1 = T/145$ 、 $x_2 = t/18$ 、 $x_3 = P/3$ 、 $x_4 = G/8$ 、 $x_5 = W/12$ 进行归一化处理。

1.4 试验方法

按照图 1 所示板坯结构选择竹席与竹帘, 在电热恒温鼓风干燥箱中, (103 ± 2)℃ 条件下干燥至恒

表 1 因素与水平

TABLE 1 Factors and levels

水平	工艺参数				
	$T/^\circ\text{C}(x_1)$	$t/\text{min}(x_2)$	$P/\text{MPa}(x_3)$	$G/\%$ (x_4)	$W/\%$ (x_5)
1	125.0(0.862)	10.0(0.556)	2.0(0.667)	5.0(0.625)	6.0(0.500)
2	135.0(0.931)	14.0(0.778)	2.5(0.833)	6.5(0.813)	9.0(0.750)
3	145.0(1.000)	18.0(1.000)	3.0(1.000)	8.0(1.000)	12.0(1.000)
4	155.0(1.069)	22.0(1.222)	3.5(1.167)	9.5(1.188)	15.0(1.250)
5	165.0(1.138)	26.0(1.444)	4.0(1.333)	11.0(1.375)	18.0(1.500)

注: 括号内数据为归一化数值。

重, 取出后用塑料袋密封冷却至室温, 称量初始质量。将胶黏剂按胶与水质量比为 1:0.8 稀释后, 用浸胶和喷胶相结合的方法进行施胶, 按稀释后胶黏剂的固体含量值, 及质量称量的结果来调整施胶量到试验相应的水平值。然后在 90℃ 条件下干燥或者喷施水分, 调整板坯的含水率到相应水平值。按照板坯结构的要求组坯, 连同不锈钢垫板一起送入热压机, 采用微机控制试验热压机压制成板材。

从平行试验的两块板材中, 按纵、横方向分别锯取各 8 个试样用于静曲强度 (MOR) 和弹性模量 (MOE) 检测, 按 $JG/T156-2004$ ^[4] 测试其纵、横方向的静曲强度和弹性模量。

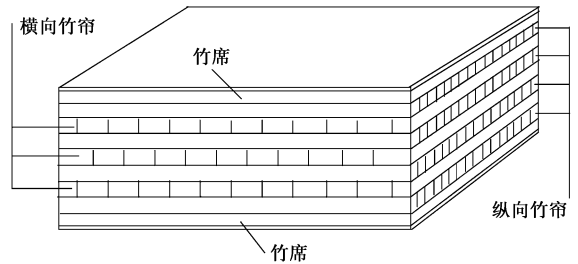


图 1 板坯结构图

FIGURE 1 Structure of the mat

2 试验结果

竹胶合板模板力学性能正交试验结果见表 2。

3 建立二阶响应面模型

从表 2 正交试验结果获取设计变量 x_i 在不同水平值组合下的设计目标 y_j , 用二阶多项式模型作为实际函数 $f(x)$ 的近似, 由于二阶函数在设计空间内是二阶曲面, 故用响应曲面逼近实际函数。

设二阶多项式函数为:

$$y_j = \beta_0 + \sum_{i=1}^n \beta_i x_i + \sum_{i=1}^n \beta_{ii} x_i^2 + \sum_{p < i} \beta_{pi} x_p x_i + \epsilon \quad (1)$$

式中: ϵ 为统计误差, 一般假设它满足均值为零的正态分布; n 为设计变量个数; β 为二阶响应面模型的回归系数; $p=1, \dots, n-1$; 利用最小二乘法, 通过对所得数据的拟合, 分别计算各二阶多项式系数 β

表 2 竹胶合板模板力学性能 $L_{25}(5^6)$ 正交试验结果
TABLE 2 $L_{25}(5^6)$ orthogonal experiment results of mechanical properties of bamboo plywood form

试验号	工艺参数水平值					力学性能			
	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	γ_1/MPa	γ_2/MPa	γ_3/GPa	γ_4/GPa
1	1	1	1	1	1	69.16	53.78	5.63	4.24
2	1	2	2	2	2	82.98	64.00	6.52	4.79
3	1	3	3	3	3	90.78	76.31	7.22	5.62
4	1	4	4	4	4	93.13	74.65	7.65	5.72
5	1	5	5	5	5	96.54	78.20	8.85	5.78
6	2	1	3	2	4	78.30	65.69	6.73	5.24
7	2	2	4	3	5	85.72	71.34	6.95	5.39
8	2	3	5	4	1	101.32	80.18	8.26	5.70
9	2	4	1	5	2	94.31	77.64	7.75	6.44
10	2	5	2	1	3	86.77	65.14	6.99	6.00
11	3	1	5	3	2	98.80	79.59	8.01	6.00
12	3	2	1	4	3	86.82	70.27	7.32	5.56
13	3	3	2	5	4	91.56	75.84	7.62	5.74
14	3	4	3	1	5	85.85	64.62	7.13	5.66
15	3	5	4	2	1	100.87	79.47	8.38	6.21
16	4	1	2	4	5	85.74	73.39	7.72	5.49
17	4	2	3	5	1	98.52	78.64	7.82	6.02
18	4	3	4	1	2	101.04	74.99	7.83	6.25
19	4	4	5	2	3	108.36	83.44	8.55	6.83
20	4	5	1	3	4	94.25	71.15	8.19	5.94
21	5	1	4	5	3	108.68	89.86	8.73	6.52
22	5	2	5	1	4	102.22	80.92	8.27	6.51
23	5	3	1	2	5	84.85	61.98	7.18	5.76
24	5	4	2	3	1	95.10	71.06	8.10	6.10
25	5	5	3	4	2	108.71	82.66	8.95	6.77

值, 得出二阶响应面模型^[5-6]。

1) 竹胶合板模板纵向静曲强度响应面模型:

$$\begin{aligned} \gamma_1 = & 15.428 + 80.175 x_2 - 15.327 x_5 - 11.394 x_1^2 - \\ & 9.648 x_2^2 - 6.435 x_3^2 - 22.067 x_4^2 - 13.981 x_5^2 - \\ & 62.771 x_1 x_2 + 57.033 x_1 x_3 + 50.778 x_1 x_4 + \\ & 31.728 x_1 x_5 - 3.051 x_2 x_3 + 12.683 x_2 x_4 + \\ & 6.650 x_2 x_5 - 11.166 x_3 x_4 - 4.863 x_3 x_5 + 4.161 x_4 x_5 \end{aligned} \quad (2)$$

2) 竹胶合板模板横向静曲强度响应面模型:

$$\begin{aligned} \gamma_2 = & 7.427 + 86.204 x_2 - 17.376 x_5 - 28.515 x_1^2 - \\ & 3.866 x_2^2 - 8.220 x_3^2 - 26.197 x_4^2 - 8.086 x_5^2 - \\ & 83.396 x_1 x_2 + 67.375 x_1 x_3 + 70.945 x_1 x_4 + \\ & 30.547 x_1 x_5 - 3.115 x_2 x_3 + 16.478 x_2 x_4 - \\ & 0.310 x_2 x_5 - 23.251 x_3 x_4 - 2.962 x_3 x_5 + 4.073 x_4 x_5 \end{aligned} \quad (3)$$

3) 竹胶合板模板纵向弹性模量响应面模型:

$$\begin{aligned} \gamma_3 = & 1.126 + 3.744 x_2 + 1.494 x_5 + 2.832 x_1^2 + \\ & 1.101 x_2^2 + 1.195 x_3^2 - 2.049 x_4^2 - 0.153 x_5^2 - \\ & 7.722 x_1 x_2 + 2.227 x_1 x_3 + 4.794 x_1 x_4 - 0.722 x_1 x_5 + \\ & 0.429 x_2 x_3 + 2.115 x_2 x_4 + 0.426 x_2 x_5 - 2.123 x_3 x_4 - \\ & 1.410 x_3 x_5 + 0.351 x_4 x_5 \end{aligned} \quad (4)$$

4) 竹胶合板模板横向弹性模量响应面模型:

$$\begin{aligned} \gamma_4 = & -0.062 + 2.854 x_2 + 4.340 x_5 + 2.485 x_1^2 + \\ & 0.391 x_2^2 + 1.587 x_3^2 + 1.105 x_4^2 - 1.452 x_5^2 - \\ & 1.590 x_1 x_2 - 1.020 x_1 x_3 + 0.656 x_1 x_4 - 0.278 x_1 x_5 - \\ & 0.205 x_2 x_3 - 0.276 x_2 x_4 - 0.782 x_2 x_5 - 1.398 x_3 x_4 + \\ & 0.314 x_3 x_5 - 0.863 x_4 x_5 \end{aligned} \quad (5)$$

为了检验回归模型对数据拟合程度的好坏, 需要对模型进行方差分析和 F 检验。通过对式(2)~(5)进行方差分析和 F 检验, 结果表明: $F_1 = 287.23 > F_{0.01}(5, 19) = 4.17, R_1^2 = 0.9869; F_2 = 204.44 > F_{0.01}(5, 19) = 4.17, R_2^2 = 0.9818; F_3 = 196.00 > F_{0.01}(5, 19) = 4.17, R_3^2 = 0.9813; F_4 = 97.88 > F_{0.01}(5, 19) = 4.17, R_4^2 = 0.9619$ 。说明上述模型均是极显著的。

4 全局最优解集的获取

竹胶合板模板的力学性能通常需要满足多项指标, 因此, 其设计优化是一个多目标问题。Pareto 遗传算法是解决多目标优化问题的有效方法。为了获取响应面模型方程的全局最优解集, 运用美国 Engineous 公司开发的 Isight 9.0 软件, 采用 Pareto 遗传算法进行求解。在 Pareto 遗传算法中采用小生境技术防止基因漂移, 使群体均匀分布在 Pareto 解集

中。在选择过程中引入了 Pareto 解集过滤器,它的作用是将每代中的非劣点保留下来,同时去除解集中的劣点^[7-8]。

4.1 约束条件

设计变量的上限和下限为表 1 水平 1 和 5。实例设计目标的上限和下限均按 JG/T156-2004^[4]的优等品要求选取见表 3。

表 3 设计目标上、下限

TABLE 3 Upper and lower limits of design objects

设计目标	y_1/MPa	y_2/MPa	y_3/GPa	y_4/GPa
下限	90.0	60.0	7.5	5.5
上限	无	无	无	无

4.2 初始值及算法控制参数

计算初始值见表 4。

表 4 初始值

TABLE 4 Initial values

设计变量	$x_1(T/^\circ\text{C})$	$x_2(t/\text{min})$	$x_3(P/\text{MPa})$	$x_4(G/\%)$	$x_5(W/\%)$
初始值	1.0(145.0)	1.0(18.0)	1.0(3.0)	1.0(8.0)	1.0(12.0)

算法控制参数:交叉率为 0.5,变异率为 0.2,种群数为 30,代数为 50。

4.3 Pareto 解

多目标优化过程如图 2 所示,经程序计算得到全局 Pareto 解集见表 5。

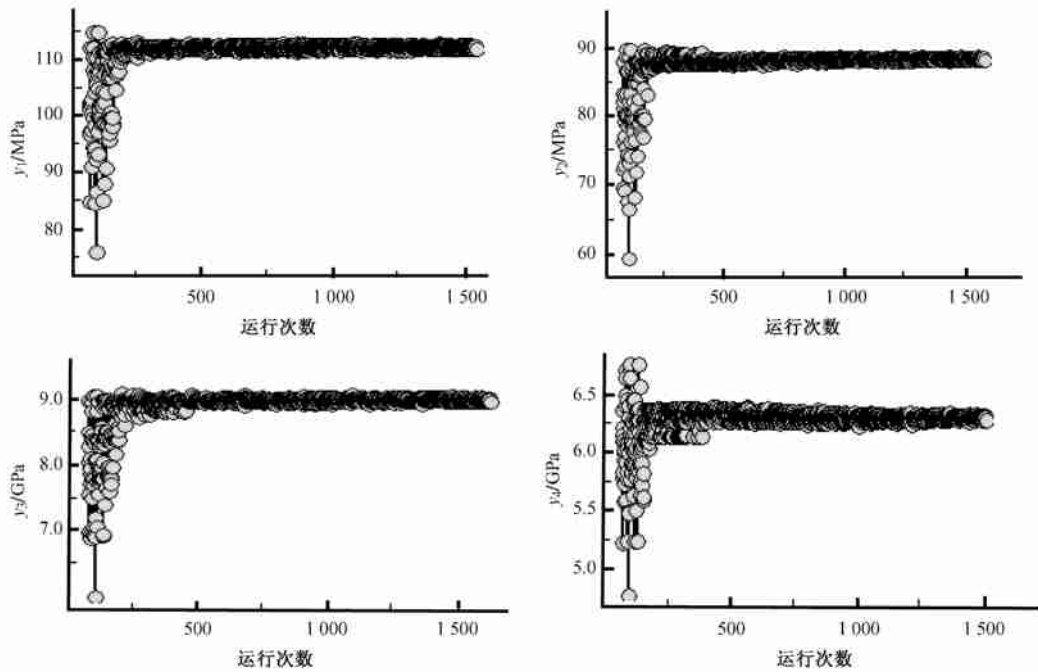


图 2 多目标优化过程图

FIGURE 2 Multi-objective optimization processing

表 5 10 个 Pareto 解

TABLE 5 10 Pareto solutions

序号	设计变量(工艺参数)					设计目标(力学性能)			
	$T/^\circ\text{C}$	t/min	P/MPa	$G/\%$	$W/\%$	y_1/MPa	y_2/MPa	y_3/GPa	y_4/GPa
1	156.5	19.8	3.6	8.0	6.7	107.32	83.50	8.65	6.13
2	163.7	17.6	4.0	8.9	16.9	112.52	90.88	8.73	6.29
3	162.1	12.3	4.0	8.6	17.7	105.92	89.17	8.46	6.16
4	163.6	11.8	4.0	8.7	15.4	109.75	91.17	8.72	6.39
5	163.9	10.3	3.8	10.0	15.5	107.52	90.47	8.58	6.34
6	163.3	17.6	4.0	8.9	15.7	113.57	91.19	8.80	6.41
7	163.1	24.6	3.8	9.9	15.5	115.89	90.71	9.25	6.48
8	163.6	17.7	4.0	8.7	15.4	113.69	90.96	8.81	6.44
9	153.7	17.7	4.0	8.8	16.6	106.47	86.15	8.33	6.12
10	159.0	24.5	4.0	8.8	17.2	112.06	88.02	9.02	6.28
初始值	145.0	18.0	3.0	8.0	12.0	97.93	77.75	7.66	5.80

4.4 Pareto 解分析

表5中10个Pareto解的设计目标值均满足表3的要求,且超过竹胶合板模板JG/T156—2004^[4]标准优等品要求。将优化获得的10个Pareto解与初始值的力学性能进行比较,各项力学性能指标均有不同程度的提高。竹胶合板模板纵向静曲强度,最大提高率为18.34%,最小提高率为8.15%,10个Pareto解平均提高了12.80%;竹胶合板模板横向静曲强度,最大提高率为17.28%,最小提高率为7.39%,10个Pareto解平均提高了14.75%;竹胶合板模板纵向弹性模量,最大提高率为20.86%,最小提高率为8.86%,10个Pareto解平均提高了14.11%;竹胶合板模板横向弹性模量,最大提高率为11.86%,最小提高率为5.40%,10个Pareto解平均提高了8.59%。

5 结 论

本文利用正交试验设计得到样本点的数据信息,通过对数据点的拟合,构建了工艺参数和力学性能指标的二阶响应面模型,应用Pareto遗传算法进行多目标优化求解,最后得到了Pareto解集。在生产实际中,可以根据具体的生产条件,构建相应的响应面模型。只要设置不同的设计目标上、下限即可

通过上述方法计算出Pareto解,此解集可用于指导竹胶合板模板生产中力学性能的优化,从而实现竹胶合板模板力学性能的优化设计。

参 考 文 献

- [1] 刘英,王凤歧.产品稳健设计响应面模型法的试验设计[J].机械设计与制造,2005(7):34-36.
- [2] 赵仁杰,喻云水.竹材人造板工艺学[M].北京:中国林业出版社,2002.
- [3] 傅峰,华毓坤.以旋转设计研究竹帘胶合板的静曲强度(MOR)和弹性模量(MOE)[J].建筑人造板,1994(3):13-15.
- [4] 中华人民共和国建设部.JG/T156—2004 中华人民共和国建筑工业行业标准竹胶合板模板[S].北京:中国标准出版社,2004.
- [5] 王海亮,林忠钦,金先龙.基于响应面模型的薄壁构件耐撞性优化设计[J].应用力学学报,2003,20(3):61-65.
- [6] 熊俊涛,乔志德.基于响应面法的跨声速翼型气动优化设计[J].实验液体力学,2005,19(1):104-108.
- [7] GIOVANNI T.LUCIANO B. *The optimization of gas turbine engine design by genetic algorithms* [R]. Huntsville, Alabama: AIAA, 2000.
- [8] DEB K. An efficient constraint handling method for genetic algorithms [J]. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 2000, 186:311-338.

(责任编辑 李文军)

欢迎订阅《中国林业教育》

《中国林业教育》是经国家新闻出版总署批准、由北京林业大学和中国林业教育学会共同主办的全国性林业教育刊物。本刊主要宣传党和国家的教育方针、政策,贯彻国家有关林业教育工作的指示精神,密切联系实际,探索林业教育的规律,交流推广林业教育、教学、管理、科研等方面的改革经验,介绍国内外林业教育的现状、发展趋势和教育科学研究动态。本刊是全国各级各类林业院校教师和学生、教育行政管理部门广大干部及其他关心林业教育的人员进行学术交流的主要园地。本刊一直被国家级图书馆、中国学术期刊网、中国教育网等收录,连续两届获得国家部委级“梁希林业图书期刊奖”。

《中国林业教育》刊号为ISSN-7232(国际标准连续出版物号)、CN11-2729/S(国内统一连续出版物号),双月刊,80页,全年定价180元。邮发代号为82-201,全国各地邮局均可订阅。未订到本刊的读者,还可直接汇款到本刊编辑部购买。

编辑部地址:北京海淀区清华东路35号北京林业大学

邮编:100083

电话:010-62338090

在线投稿网址:<http://journal.bjfu.edu.cn/jy/>

电子邮箱:liuxiaoling@bjfu.edu.cn