

基于林分状态特征的森林经营 试验样地设计新方法*

张弓乔, 惠刚盈**

(中国林业科学研究院林业研究所, 国家林业局林木培育重点实验室, 北京 100091)

摘要:传统田间试验设计方法如顺序设计、拉丁方设计以及随机区组设计方法在很大程度上考虑了林分立地、土壤或肥力等方面的差异,但没有关注立地之上的“试验对象即林分”的状态差异,加上其有限的随机过程和缺失量化的目标函数等缺陷,从而谈不上是优化的试验设计,无法保证试验开始前处理间林分状态特征的一致性。本文提出了一种全新的森林经营田间试验优化设计方法——基于林分状态特征的完全随机优化设计,并将其应用于甘肃小陇山锐齿栎天然林的森林经营田间试验设计中。基于林分状态特征的完全随机优化设计得到小区排列方案,其处理间林分状态特征参数的差异均小于5%,优于传统田间试验设计方法,能确保试验林分状态的一致性。利用R语言实现该优化设计并使其可以在计算机上自动得到最佳的小区排列方案,提高了森林经营田间试验的精度,为科学试验的开展奠定了坚实的理论基础。

关键词:森林经营;林分状态特征;田间试验;试验设计优化;R语言

中图分类号:S750

文献标识码:A

A New Design of Field Trial for Forest Management Based on Stand Characteristics

ZHANG Gong-qiao, HUI Gang-ying

(Research Institute of Forestry, Chinese Academy of Forestry, Key Laboratory of Tree Breeding and Cultivation, State Forestry Administration, Beijing 100091, China)

Abstract: The traditional designs of field trials for forest management, such as sequential design, Latin square design and RBD, consider mainly on the differences in soil and other site conditions, but seldom the conditions of the stand itself. This paper proposes a new design-completely random and optimization design, which removes away the limit on randomization and provides optimization using a quantitative objective function. The design has been applied to a *Quercus aliena* var. *acuteserrata* natural forest in Xiaolongshan, Gansu Province. The difference of stand characteristics among treatments in the new design was less than 5%. This indicates a better consistency of stand state characteristics than the traditional designs. R language was used to achieve the optimal design and automatically generated the best arrangement scheme by computer. The new design can improve the accuracy of field trial for forest management and provides some references for forest management trials.

Key words: forest management; stand characteristics; field trial; optimal design; R language

收稿日期:2014-10-14

基金项目:中央级公益性科研院所基本科研业务费专项(Rif2014-10)

作者简介:张弓乔,在读博士.主要研究方向:森林经营. E-mail: zhanggongqiao@126.com

* 致谢:诚挚地感谢赵中华、胡艳波、白超等在研究中给予热情帮助!

** 通讯作者:研究员,博士生导师.主要研究方向:森林经营. E-mail: hui@caf.ac.cn

田间试验设计是控制试验误差的主要手段^[1],通常所讲的田间试验设计是指根据试验地的具体条件,将各试验小区做最合理的设置与排列^[2]。自从1923年 Fisher^[3]提出随机区组和拉丁方试验设计以来便有了试验设计的概念。常用的田间试验设计按照小区在重复区内的排列方式,分为顺序排列和随机排列两大类^[2]。顺序排列是指试验中的各个处理在各重复区内按一定的顺序进行排列,这种设计方法简单,观察记载及田间操作较方便^[4],其缺点是对试验地及试材等要求均匀一致,在土壤及其他非试验条件有明显的方向性梯度变化时易受系统误差的影响;而且不能正确估计试验误差,所以无法采用以概率论为基础的统计分析方法进行试验结果的显著性测验^[5]。随机排列指各试验处理以及对照在一个重复区中的排列是随机的,这种试验设计一般是按照试验设计的3条基本原理而设计的^[4],其优点在于能克服土壤及其他非试验因素造成的系统误差的影响,提高试验的正确性,有正确的误差估计,获得的试验结果能够进行显著性测验,如完全随机设计,其采用抽签法或查随机数表法来实现试验小区的随机排列,以避免试验环境(土壤条件)不完全一致而造成的影响^[2]。另一种常用的田间试验设计方法是随机区组设计,这种方法根据“局部控制”的原则,将试验地按土壤肥力程度设置重复(区组),然后在每个区组内划分小区,区组内各处理随机排列,这种设计是随机排列设计中一种最常用、最基本的试验设计方法^[6];但当试验受地段限制时,一个试验的所有区组不能排在同一地块上,可将少数区组放在另一地段。因此,随机区组的方法只能在一定程度上减小误差变异,而不能完全避免这种差异^[2,7]。以上试验设计方法针对的是假设试验条件一致或是已知某种状况(如土壤条件)差异情况下定性安排试验的排列。虽然在随机试验设计中试验小区的排列方式是通过抽签、查随机数表或计算机模拟获得,但实质上是对所要安排的试验小区编号数字的数学随机化过程,且均是有限的随机过程,虽有优化方法中的约束条件但缺失目标函数,因此,并非是优化的试验设计,无法确保试验设计后的试验组与对照组具有非常小的林分状态差异。这里讲的林分状态指在一定立地条件下的林分基本因子,如平均直径、树高、断面积和林分空间结构参数(角尺度、大小比数、混交度)等。

林业田间试验与农田、室内沙盘控制试验以及

苗圃地布置试验大为不同。现存的森林通常分布在地,且所处的环境复杂多样,即使在同一山坡上也存在立地条件、树种组成和林分结构的差异。在这种复杂多样的山地划分小区后,通常忽视了安排试验时处理间林分状态的差异分析,造成各个处理间的林分差异增大,使试验在开始前已经存在误差;而这种试验前的误差使开始的试验条件不一致,最终导致试验数据不准确。消除这种误差较为普遍的做法是设置对照与处理固定试验地并进行一定的重复,也可以使用降低变异误差的田间试验设计方法,如为了降低土壤差异可以使用随机区组设计;但至今还没有一种能比较并缩小试验林分各处理间林分状态特征(特别是林分空间结构)差异的田间试验设计方法。本研究试图找到这样一种田间试验设计方法,在试验开始前,通过找到小区最合理的排列,尽可能消除各个处理间的林分状态差异,尽可能地缩小试验前各处理间的差异。

1 基于林分状态特征的完全随机优化设计

完全随机设计要求其将同质的受试对象随机地分配到各处理中进行同期平行观察。研究效率通常不高,小样本时可能均衡性较差,抽样误差大^[1-2,8]。随机区组设计只能控制一个方向的土壤差异,且要求区组内受试对象数与处理数相等,处理数过多时局部控制的效率降低;而且完全随机设计与随机区组设计中随机的次序由抽签法、查随机数表或计算机模拟得到一次的试验方案。这种随机抽取的次数是有限次的,且没有考虑到各个处理间的林分状态差异,因此,无论是完全随机设计还是随机区组设计,都不能保证试验设计完成后各个处理间的林分状态一致。

1.1 完全随机优化设计的目标函数

描述林分状态特征的参数很多,本研究主要选取3个林分基本参数(平均胸径、平均树高、小区总断面积)和3个林分空间结构参数(角尺度、大小比数、混交度)^[9-25]。

首先,将 q 定义为处理间林分状态特征(林分基本参数与林分空间结构参数)各参数的累计差值(公式1),优化方法是在1000次随机的小区排列方案中找到最小 q 值(公式2),它所对应的小区排列方案即为最优设计方案。公式(2)即为所构造的优化目标函数。公式(1)中由于林分空间结构参数的

取值范围为 $[0, 1]$ ^[21],而林分基本参数具有不同的量纲,所以对林分基本参数值进行了标准化处理,方法是将林分基本参数值与其相应参数的最大值相比。

$$q = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n |\bar{W}_i - \bar{W}_j| + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n |\bar{U}_i - \bar{U}_j| + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n |\bar{M}_i - \bar{M}_j| + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \left| \frac{\bar{D}_i - \bar{D}_j}{\bar{D}_{\max}} \right| + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \left| \frac{\bar{H}_i - \bar{H}_j}{\bar{H}_{\max}} \right| + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \left| \frac{\bar{G}_i - \bar{G}_j}{\bar{G}_{\max}} \right| \quad (1)$$

$$Q = \min(q_1, q_2, q_3, \dots, q_{1000}) \quad (2)$$

式中: n —试验处理个数; \bar{W}_i (or \bar{W}_j) = $\frac{1}{m} \sum_{k=1}^m \bar{W}_k$; \bar{W}_k —每个处理的重复(小区)数; \bar{W}_i 、 \bar{W}_j —第 i 个或第 j 个处理的角尺度均值; \bar{W}_k —第 k 个小区的角尺度均值; \bar{U}_i (or \bar{U}_j) = $\frac{1}{m} \sum_{k=1}^m \bar{U}_k$; \bar{U}_i 、 \bar{U}_j —第 i 个或第 j 个处理的大小比数均值; \bar{U}_k —第 k 个小区的大小比均值; \bar{M}_i (or \bar{M}_j) = $\frac{1}{m} \sum_{k=1}^m \bar{M}_k$; \bar{M}_i 、 \bar{M}_j —第 i 个或第 j 个处理的混交度均值; \bar{M}_k —第 k 个小区的混交度均值; \bar{D}_i (or \bar{D}_j) = $\frac{1}{m} \sum_{k=1}^m \bar{D}_k$; \bar{D}_i 、 \bar{D}_j —第 i 个或第 j 个处理所有重复小区的胸径均值; \bar{D}_k —第 k 个小区的胸径均值; \bar{H}_i (or \bar{H}_j) = $\frac{1}{m} \sum_{k=1}^m \bar{H}_k$; \bar{H}_i 、 \bar{H}_j —第 i 个或第 j 个处理所有重复小区的树高均值; \bar{H}_k —第 k 个小区的树高均值; \bar{G}_i (or \bar{G}_j) = $\frac{1}{m} \sum_{k=1}^m \bar{G}_k$; \bar{G}_i 、 \bar{G}_j —第 i 个或第 j 个处理所有重复小区的断面积均值; \bar{G}_k —第 k 个小区的断面积均值; \bar{D}_{\max} —试验所有处理中胸径均值的最大值; \bar{H}_{\max} —试验所有处理中树高均值的最大值; \bar{G}_{\max} —试验所有处理中断面积均值的最大值。

1.2 完全随机优化设计的算法

若试验有 n 个处理(经营措施),每个处理 m 个试验小区(重复),一共可划分 $n \times m$ 个试验小区。对全部小区编号,共有 $1 \sim n \cdot m$ 个数字。编写 R 语言的计算机程序,将这个数字序列打乱并重新排列组成新的数列。将这个新数列依次划分为 n 组,也就是 n 个新的处理,每组仍为 m 个数字,则这 m 个数字就是新处理中的全部小区(重复)编号。例:假设试验有 3 个处理,每个处理有 5 个试验小区(重复),即 $n=3, m=5$;则首先将 15 个小区编号为 1~15 号;然后随机生

成由这 15 个数字组成的新排列;最后重新划分为 3 组,每组生成一个新的处理,仍为 5 个数字,则得到了新试验设计方案。这个过程重复一遍类似于经典的随机化方法。具体过程见图 1。

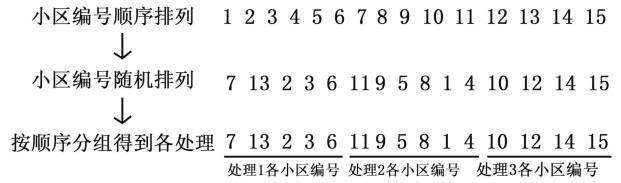


图1 随机数列的小区分组过程示意图

这个随机过程自动进行 1 000 次,将会得到 1 000 次不同的试验设计方案,每个方案可以得到一个 q 值,从中找到处理间差异最小,即 q 值最小的方案。图 2 为实现该过程的流程图。

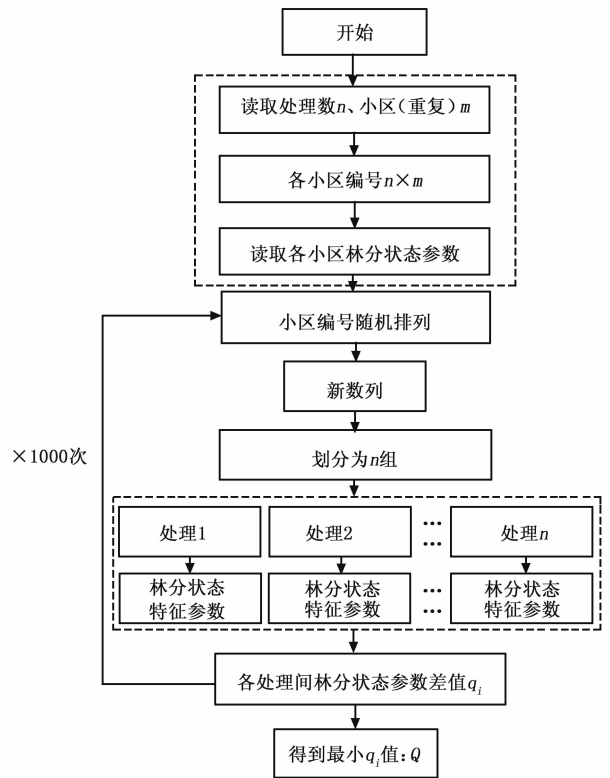


图2 基于林分状态特征的完全随机优化设计流程示意图

以下为完全随机优化设计 R 语言的主要指令。

#读取各小区林分状态特征参数数据

setwd("xxx")

Data1 = read.table(file = "xxx.txt", header = TRUE)

#产生 1 000 组小区排列方式, n 为小区总数

for (i in 1:1000) {

#Data2 = rnorm(n)

……}

n 个小区划分为 m 组, m 为处理数

for (i in $n \times 1\ 000/m$) {

$M_1 = \text{Data2}[(m \times i - (m - 1)),]$

$M_2 = \text{Data2}[(m \times i - (m - 2)),]$

……

$M_m = \text{Data2}[m \times i]$ }

m 个处理间差值比较

for (i in 1:1 000) {

Diff = $(M_1 - M_2) + (M_1 - M_3) \dots + (M_1 - M_m) \dots + (M_2 - M_3) \dots + (M_2 - M_m) \dots + (M_{(m-1)} - M_m)$ }

#找到 Diff 的最小值并代回数列为最佳小区排列

Data2[min(Diff)]

2 试验林分经营设计

为验证所提出的试验设计新方法,本文对甘肃小陇山锐齿栎天然林进行了森林经营试验设计优化研究;同时与传统方法(顺序设计法、拉丁方设计法以及随机区组设计法)进行对比分析。

试验林分位于甘肃小陇山大杆子沟。甘肃小陇山位于甘肃省东南部、秦岭西端,地处我国华中、华北、喜马拉雅、蒙新四大自然植被区系的交汇处($33^\circ 31' \sim 34^\circ 41' \text{N}$, $104^\circ 23' \sim 106^\circ 43' \text{E}$),海拔 700 ~ 2 500 m。该区处于我国暖温带南缘与北亚热带的过渡地带,气候温暖湿润,大多数地域属暖湿润 - 中温半湿润大陆性季风气候类型;年平均气温 7 ~ 12℃,年均降水量 600 ~ 900 mm,林区相对湿度达 78%,年日照时数 1 520 ~ 2 313 h,无霜期 130 ~ 220 d,属湿润和半湿润类型;土壤为黄褐土;植被以锐齿栎(*Quercus aliena* var. *acuteserrata* Maxim.)和辽东栎(*Quercus liaotungensis* Koidz)为主。

该试验地由“十二·五”国家科技支撑计划“西北华北森林可持续经营技术研究与示范”课题组建立,本研究基于课题组对试验地的林木每木定位和全面调查数据,利用林分空间结构分析软件 Winkel-mass 进行试验林分各小区的空间结构参数计算。计算机程序采用 R 语言进行编写、调试与结果的处理^[26-27]。

在甘肃小陇山大杆子沟锐齿栎天然林 3 号小班试验地内,进行包含 4 个处理(代号为 A、B、C、D)的森林经营试验。4 个处理分别为结构化经营^[28]、近

自然经营、次生林综合培育以及对照。每种处理均设置 4 个重复(A1 ~ A4、B1 ~ B4、C1 ~ C4、D1 ~ D4),共 $4 \times 4 = 16$ 个小区,依次编号(1 ~ 16 号)(图 3),该试验地田间试验设计的处理数 $n = 4$, $m = 4$,共有小区 $n \times m = 16$ 个。小区面积均为 $20 \text{ m} \times 20 \text{ m} = 400 \text{ m}^2$ 。

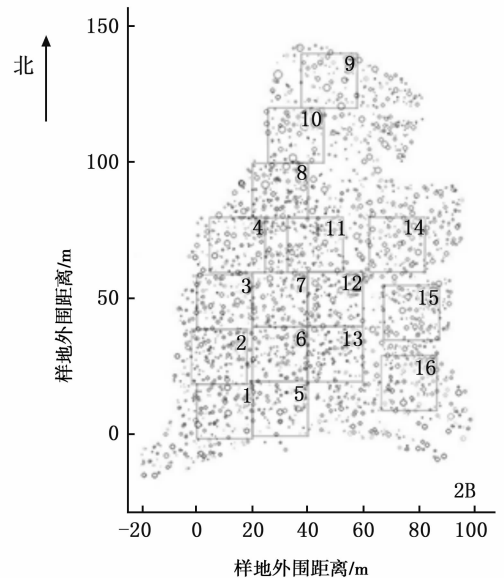


图3 甘肃小陇山锐齿栎天然林小区分布示意图
(图中的空心圆代表不同胸径的林木,下同)

在对锐齿栎天然林划分小区后,计算各小区林分空间结构与林分基本参数(表 1)。

表 1 甘肃小陇山锐齿栎天然林各小区林分状态特征参数

小区 编号	空间结构参数			林分基本参数		
	W	U	M	D/cm	H/m	G/m^2
1	0.500	0.519	0.697	12.234	11.667	1.240
2	0.527	0.511	0.614	10.924	11.953	1.133
3	0.525	0.480	0.656	11.755	12.090	1.260
4	0.531	0.515	0.700	10.183	11.805	1.090
5	0.511	0.483	0.636	11.985	11.803	0.956
6	0.496	0.539	0.629	11.173	12.149	1.162
7	0.469	0.496	0.759	11.638	11.605	1.256
8	0.500	0.503	0.623	11.762	11.804	1.570
9	0.506	0.512	0.774	11.973	11.334	0.960
10	0.471	0.478	0.802	12.244	10.894	1.011
11	0.503	0.478	0.589	10.322	10.814	1.116
12	0.556	0.514	0.597	11.193	11.912	1.155
13	0.468	0.504	0.579	11.017	11.907	1.051
14	0.529	0.510	0.740	12.150	10.887	1.085
15	0.462	0.485	0.746	11.766	11.289	1.303
16	0.500	0.492	0.754	11.532	11.998	1.213
均值	0.50	0.501	0.681	11.491	11.620	1.160

注: W 为小区平均角尺度; U 为小区平均大小比; M 为小区平均混角度; D 为小区平均胸径; H 为小区平均树高; G 为小区总断面积;下同。

3 完全随机优化试验设计应用结果

从表1可见:试验林分各小区林分状态特征的差异非常明显,例如,混交度最小值为0.579,最大值则为0.802,混交强度不一^[28]。在各参数差异明显的情况下进行划分处理试验,势必导致各处理间林分状态特征不一致的情况。

应用基于林分状态特征的完全随机优化设计方法,对其进行实际样地的小区布设。1 000次随机的小区排列方案编号为第1~1 000组,计算出这1 000组得到的 q 值,表2列出了该试验地 q 值相对较小的前5组的方案编号、相应的 q 值及其顺序。由表2可见:在这1 000组随机小区排列方案中,具有最小 q 值的为第766组。

表2 甘肃小陇山锐齿栎天然林 q 值相对较小的前5组排序及其方案编号

方案编号	q 值	排序
第265组	0.652	4
第270组	0.617	2
第465组	0.646	3
第600组	0.655	5
第766组	0.586	1

为了进一步比较分析,分别给出了试验地 q 值相对较小的前5组小区排列后各处理的具体数值及其差值(表3)。从表3可见:由于甘肃小陇山试验地为天然林,林分空间结构参数与林分基本参数相差都较大,完全随机设计得到的5组试验的最大差值出现在第600组,其 q 值排第5位,其断面积差值达到6.08%,其它组的所有差值都在5%以下。

根据目标函数,只选取具有最小 q 值的小区排列方案。甘肃小陇山锐齿栎天然林具有最小值的小区设计方案为第766组, $q_{766}=0.586$,其排列方式见图4。由表3可见:第766组设计方案中,4组处理的所有林分状态特征参数差值都小于5%,大部分控制在2%以内。每组处理都与平均值相差很小,说明各处理间的林分状态基本相同。只有林分各处理间的林分状态相似,才能保证试验开始条件一致,而不会因为试验前的处理差异影响试验结果。

为了与完全随机优化试验得到的结果相比较,还应用传统的设计方法(顺序设计、拉丁方设计、随机区组设计)对甘肃小陇山锐齿栎天然林的小区排列进行模拟设计,并与本文提出的完全随机优化设计结果进行比较,得到的处理间差值见表4。由表4看出:3种传统方法得到的小区布设使得处理间一

表3 甘肃小陇山锐齿栎天然林前5组小区排列方案各处理的林分状态特征

	空间结构参数			基本参数		
	W	U	M	D/cm	H/m	G/m^2
优化分组	第766组					
A处理	0.506	0.500	0.693	11.500	11.591	1.139
B处理	0.500	0.507	0.667	11.315	11.657	1.183
C处理	0.512	0.503	0.693	11.967	11.457	1.142
D处理	0.496	0.496	0.670	11.180	11.773	1.176
A差值/%	0.44	0.29	1.75	0.08	0.25	1.81
B差值/%	0.67	1.19	2.03	1.53	0.32	1.95
C差值/%	1.64	0.17	1.85	4.15	1.40	1.51
D差值/%	1.41	1.07	1.58	2.70	1.32	1.38
	第270组					
A处理	0.506	0.500	0.693	11.497	11.590	1.139
B处理	0.500	0.507	0.667	11.313	11.663	1.183
C处理	0.508	0.498	0.706	11.521	11.444	1.108
D处理	0.500	0.500	0.658	11.631	11.784	1.210
A差值/%	0.44	0.29	1.75	0.08	0.25	1.81
B差值/%	0.67	1.19	2.03	1.53	0.32	1.95
C差值/%	0.96	0.60	3.66	0.26	1.49	4.46
D差值/%	0.73	0.31	3.38	1.18	1.41	4.32
	第465组					
处理	0.492	0.481	0.710	11.937	11.517	1.133
B处理	0.500	0.507	0.667	11.313	11.663	1.183
C处理	0.520	0.508	0.678	11.472	11.590	1.157
D处理	0.501	0.509	0.669	11.240	11.711	1.168
A差值/%	2.24	3.97	4.27	3.89	0.87	2.36
B差值/%	0.67	1.19	2.03	1.53	0.32	1.95
C差值/%	3.33	1.29	0.49	0.12	0.26	0.23
D差值/%	0.42	1.48	1.75	2.24	0.80	0.65
	第265组					
A处理	0.516	0.510	0.709	11.521	11.456	1.176
B处理	0.497	0.498	0.652	11.338	11.893	1.176
C处理	0.506	0.513	0.681	11.705	11.650	1.143
D处理	0.494	0.484	0.681	11.399	11.480	1.147
A差值/%	2.61	1.78	4.19	0.23	1.39	1.37
B差值/%	1.23	0.72	4.29	1.37	2.32	1.31
C差值/%	0.47	2.28	0.03	1.92	0.31	1.55
D差值/%	1.84	3.34	0.06	0.78	1.23	1.13
	第600组					
A处理	0.500	0.504	0.711	11.423	11.553	1.230
B处理	0.512	0.501	0.647	11.460	11.711	1.132
C处理	0.509	0.496	0.687	11.582	11.833	1.146
D处理	0.493	0.504	0.679	11.497	11.383	1.132
A差值/%	0.74	0.54	4.40	0.61	0.53	6.08
B差值/%	1.72	0.02	4.96	0.26	0.77	2.39
C差值/%	1.15	1.00	0.84	0.84	1.81	1.29
D差值/%	2.13	0.48	0.28	0.02	2.05	2.39

些林分状态特征参数的最大差值分别达8.38%(混交度)、11.71%(断面积)与14.10%(断面积)。拉丁方设计有4个参数的差值在5%以上,顺序设计和随机区组设计分别有3个。顺序设计和拉丁方设计既不能保证林分空间结构特征的差异最小,也不能

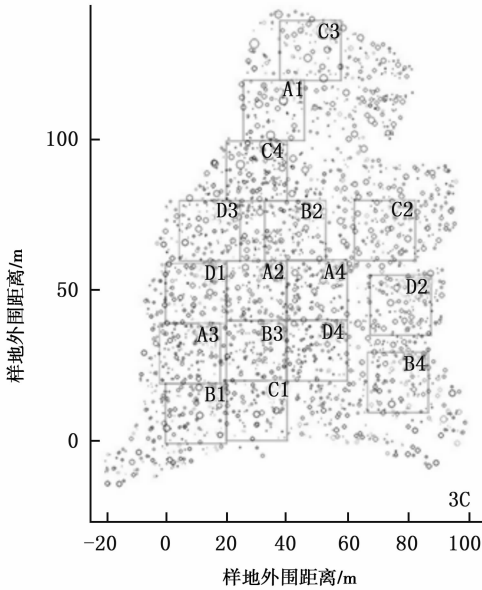


图4 甘肃小陇山锐齿栎天然林应用完全随机优化设计小区(第766组)排列示意图

表4 不同设计方法各处理的甘肃小陇山锐齿栎天然林林分状态特征参数差异的比较 %

	空间结构参数			基本参数		
	W	U	M	D	H	G
完全随机优化设计						
A	0.44	0.29	1.75	0.08	0.25	1.81
B	0.67	1.19	2.03	1.53	0.32	1.95
C	1.64	0.17	1.85	4.15	1.40	1.51
D	1.41	1.07	1.58	2.70	1.32	1.38
顺序设计						
A	3.32	0.78	0.87	2.20	1.76	5.55
B	0.54	2.27	8.38	3.74	1.31	1.54
C	0.68	1.10	3.82	1.03	0.80	6.93
D	3.46	4.15	3.69	2.57	2.27	0.15
拉丁方设计						
A	5.64	0.87	1.82	0.98	0.15	7.64
B	2.94	1.67	4.39	0.73	1.32	11.71
C	2.32	1.37	7.51	0.82	0.06	0.57
D	0.38	2.18	1.30	0.57	1.11	3.50
随机区组设计						
A	1.52	0.11	2.56	1.07	1.84	14.10
B	2.96	0.57	1.50	2.33	1.08	10.91
C	0.58	0.31	1.69	2.88	0.09	7.18
D	2.02	0.99	2.76	0.51	0.85	3.99

保证林分基本特征相一致;随机区组设计虽然能保证处理间的林分空间结构特征相似,却不能保证林分基本特征相似,其中断面积的最大差值达14.10%。只有完全随机优化设计的差值都控制在5%以内。因此认为,顺序设计、拉丁方设计、随机区

组设计都不能保证天然林处理组与对照组间的林分状态特征的一致性。只有完全随机优化设计可以保证试验前的林分状态条件相似从而达到提高试验精度的目的。

4 结论与讨论

传统田间试验设计方法如顺序设计、拉丁方设计以及随机区组设计虽定性的考虑了林分立地、土壤或肥力等方面的差异^[28],但这些方法都不能保证试验开始前处理间林分状态特征的一致,且随机设计方法都是有限次的随机过程。本研究首次提出基于林分状态特征的完全随机优化设计方法,并构造了相应的目标函数。在进行实际林分的田间试验设计时,只需将试验地分为若干小区,利用计算机程序可得到最佳的试验方案,使每组处理的林分分布差异和树种组成差异降到最低。这种完全随机优化设计的方法普遍适用于森林经营田间试验设计。

将基于林分状态特征的完全随机优化设计方法应用到甘肃小陇山大杆子沟天然林进行森林经营试验设计优化研究,同时与传统方法,如顺序设计法、拉丁方设计法以及随机区组设计法进行了对比分析,并采用了最优小区排列方案。结果表明,这种方法完全可以保证试验地各个处理间或处理与对照间的林分状态差异小于5%,从而确保试验前处理间林分状态的一致性;而应用顺序设计、拉丁方设计与随机区组设计不论是林分基本特征还是林分空间结构参数其差异都远大于完全随机优化设计方案。

在完全随机优化设计的目标函数中,林分空间结构参数与林分基本参数合并在一起计算,为避免量纲、单位不一致的问题,必须对基本参数数值进行标准化处理。

鉴于田间试验设计侧重点不同,本研究认为,可以根据实际情况进行类似的完全随机优化设计,当试验偏重于优化林分空间结构时,则以林分空间结构参数为主,使试验地处理组与对照组的林分空间结构参数基本保持一致。因此,在优化时,可采用优先比较各处理间的空间结构参数,再比较基本特征参数的方法。计算1000组不同小区排列方案得到的空间结构参数的差异,得到具有最小值的小区排列方案,再在这些最小值的小区排列方案中找到基本参数差异最小的排列方式。这种方法更有利于衡量不同处理间林分空间结构特征的一致性。

参考文献:

- [1] 陈魁. 试验设计与分析[M]. 北京:清华大学出版社有限公司, 2005:1-31.
- [2] 马育华. 试验设计[M]. 北京:农业出版社, 1982:5-11.
- [3] Fisher R A. Statistical methods for research workers[M]. Edinburgh: Genesis Publishing Pvt Ltd, 1925: 25-48.
- [4] 李慧贤. 田间实验常用的设计排列及其优缺点[J]. 现代农业, 1995, 21(5): 19-21.
- [5] 续九如, 黄智慧. 林业试验设计[M]. 北京:中国林业出版社, 1995:18-29.
- [6] 胡良平, 贾元杰. 用 SAS 软件实现随机区组设计定量资料的统计分析[J]. 药学服务与研究, 2011, 11(5): 330-332.
- [7] 王致和. 田间试验中的双向随机区组设计[J]. 云南农业, 2002, 18(10): 30-31.
- [8] Hinkelmann K, Kempthorne O. Design and analysis of experiments; Introduction to experimental design[C]. New York: Wiley Series in Probability and Mathematical Statistics. Applied Probability and Statistics(EUA), 1994: 145-196.
- [9] v Gadow K, Zhang C Y, Wehenkel C, et al. Forest structure and diversity[M]. Continuous cover forestry. 2nd edition. Managing Forest Ecosystems 23. Dordrecht: Springer, 2012: 18-23.
- [10] Pommerening A. Evaluating structural indices by reversing forest structural analysis[J]. Forest Ecology and Management, 2006, 224(3): 266-277.
- [11] Hui G Y, Zhao X H, Zhao Z H, et al. Evaluating tree species spatial diversity based on neighborhood relationships[J]. Forest Science, 2011, 57(4): 292-300.
- [12] Li Y, Hui G Y, Zhao Z H, et al. The bivariate distribution characteristics of spatial structure in natural Korean pine broad-leaved forest[J]. Journal of Vegetation Science, 2012, 23(6): 1180-1190.
- [13] v Gadow K, Kleinn C. Forest Management, Science-based and understandable[C]. Peterson C E, Maguire D A. Balancing ecosystem values-innovative experiments for sustainable forestry. USDA Forest Service, General Technical Report, 2005, PNW-GTR-635: 15-23.
- [14] Newton P F, Jolliffe P A. Assessing processes of intraspecific competition within spatially heterogeneous black spruce stands[J]. Canadian journal of forest research, 1998, 28(2): 259-275.
- [15] Kuuluvainen T, Pukkala T. Effect of crown shape and tree distribution on the spatial distribution of shade[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 1987, 40(3): 215-231.
- [16] Hui G Y, Zhao X H, Zhao Z H, et al. Evaluating tree species spatial diversity based on neighborhood relationships[J]. Forest Science, 2011, 57(4): 292-300.
- [17] v Gadow K, Fuldner K. Zur bestandesbeschreibung in der forsteinrichtung[J]. Forst und Holz, 1993, 48(21): 602-606.
- [18] Fuldner, K. Strukturbeschreibung von Buchen Edellaubholz Mischwäldern. Dissertation Universität Göttingen[M]. Göttingen: CuvillierVerlag, 1995:28-179.
- [19] 克劳斯·冯佳多, 惠刚盈. 森林生长与干扰模拟[M]. Göttingen: Cuvillier Verlag, 1998: 56-71.
- [20] v Gadow K, Hui G Y. Modelling forest development[M]. Dordrecht: Kluwer Academic Publisher, 1999: 48-92.
- [21] 惠刚盈, Gadow K v. 森林空间结构量化分析方法[M]. 北京:中国林业出版社, 2003:13-55.
- [22] Aguirre O, Hui G Y, Gadow K v, et al. An analysis of spatial forest structure using neighborhood-based variables[J]. Forest Ecology and Management, 2003, 183(1): 137-145.
- [23] 惠刚盈. 一个新的林分空间结构参数——大小比数[J]. 林业科学研究, 1999, 12(1): 1-6.
- [24] Hui G Y, Albert M, Gadow K v. Das Umgebungsmaß als Parameter zur Nachbildung von Bestandesstrukturen [J]. Forstwissenschaftliches Centralblatt, 1998, 117(1): 258-266.
- [25] Moeur M. Characterizing spatial patterns of trees using stem-mapped data[J]. Forest science, 1993, 39(4): 756-775.
- [26] 赵培信, 杨宜平. 《抽样调查》教学中无放回随机抽样的 R 软件实现[J]. 科技信息, 2012(31): 26-26.
- [27] 梁一池. 种子园配置设计的计算机处理系统[J]. 福建林学院学报, 1995, 15(2): 156-159.
- [28] Montgomery D. 实验设计与分析[M]. 汪仁官. 北京:中国统计出版社, 1998:7-25.