

采伐干扰对帽儿山天然次生林土壤表层水分空间异质性的影响

谷加存¹, 王政权^{1*}, 韩有志^{1,2}, 王向荣¹, 梅 莉¹

(1. 东北林业大学 林学院, 哈尔滨 150040, 2. 山西农业大学 林学院, 太谷 030801)

摘要:干扰是引起生态系统空间异质性的的重要因素之一。采用地统计学的理论和方法,研究了帽儿山天然次生林受到不同强度采伐干扰后(分别为采伐 50%和皆伐)林地表层(3~5cm)土壤水分的空间异质性和格局。结果表明,采伐干扰明显降低了林地表层平均水分含量,除 2002 年夏季,采伐 50%样地与对照样地之间没有显著差异外($p>0.05$),不同样地和不同季节之间均有显著的差异($p<0.01$)。变异函数分析显示,干扰改变了表层水分的空间异质性特征。两年春季和夏季 4 次取样结果表明,采伐干扰导致平均块金值和基台值降低,平均结构方差比随着采伐强度的增大而减小。变程则不随采伐强度增大而改变,采伐后第 1 年春季土壤表层水分变程较小、夏季较大,在第 2 年,采伐 50%的样地春季变程较大而夏季较小,皆伐样地则与 2002 年一致。观测的 2 年内,土壤表层水分空间异质性主要受到结构因素的影响($>50%$),但是,采伐干扰有引起结构方差比降低的趋势。空间格局分析表明,采伐干扰引起土壤表层水分空间格局的改变。对于原来空间格局较强的系统,干扰有降低空间格局强度的作用。这种影响在春季和夏季有明显不同,干扰对春季土壤表层水分空间格局的影响明显大于夏季,干扰导致春季格局比夏季格局明显破碎化。

关键词:土壤水分;空间异质性;采伐;地统计学;天然次生林
文章编号:1000-0933(2005)08-2001-09 **中图分类号:**S718.51 **文献标识码:**A

Effects of harvesting on spatial heterogeneity of soil moisture in secondary forests of Maoershan region

GU Jia-Cun¹, WANG Zheng-Quan^{1*}, HAN You-Zhi^{1,2}, WANG Xiang-Rong¹, MEI Li¹ (1. School of Forestry, Northeast Forestry University, Harbin 150040, China; 2. School of Forestry, Shanxi Agriculture University, Taigu 030801, China). *Acta Ecologica Sinica*, 2005, 25(8): 2001~2009.

Abstract: The spatial and temporal variability in soil moisture is affected by a variety of factors, such as topography, climate, vegetation, soil properties, etc. Harvesting is one of important sources resulting in spatial heterogeneity in soil moisture. However, effects of harvesting on spatial heterogeneity in soil moisture were not clear. Here, we used geostatistics approach to quantify spatial heterogeneity in soil moisture caused by harvesting. Our objectives were to (1) examine how harvesting affected variation of soil moisture; (2) quantify effects of harvesting on spatial heterogeneity and spatial pattern in soil moisture, and (3) test whether the variations were related to harvesting intensity.

This research was conducted in the secondary forests at the Maoershan Forest Research Station (45°21'~45°25'N, 127°30'~127°34'E) of Northeast Forestry University. In May 2001, three 50m×50m plots with similar stand structure were treated, i. e., Treatment A (control), Treatment B (randomly harvesting 50% of basal area), and Treatment C (clear cutting). There was 10m buffer zone on each side of the plots. There were 160, 154, and 154 sampling points in Treatment A, B, and C, respectively. We divided each plot into 100 grids at 4m intervals, randomly selected two subplots (8m×8m) in each plot, and

基金项目:国家自然科学基金资助项目(30070132);国家自然科学基金重点资助项目(30130160)
收稿日期:2004-10-10;**修订日期:**2005-05-28
作者简介:谷加存(1979~),男,齐齐哈尔人,硕士生,主要从事林分空间异质性、格局与过程研究。E-mail: gjchun001@yahoo. com. cn
*** 通讯作者** Author for correspondence. E-mail: wzqsily@mail. nefu. edu. cn
Foundation item: National Natural Science Foundation of China (No. 30070132; 30130160)
Received date: 2004-10-10; **Accepted date:** 2005-05-28
Biography: GU Jia-Cun, Master candidate, mainly engaged in forest spatial heterogeneity and pattern. E-mail: gjchun001@yahoo. com. cn

took soil samples diagonally in the plots and subplots. This protocol ensured the interval distance to range from 0.5m to 56m. At each sampling point, topsoil (3~5cm) samples were taken for gravimetric water content determination on May 22 and August 28 in 2002-year, June 1 and August 26 in 2003-year. Semivariogram and ordinary block kriging were applied for analyses of spatial pattern and heterogeneity in soil moisture.

Harvesting decreased obviously topsoil moisture *in situ*, with treatment C driest and treatment A wettest. Both treatment and sampling date had a significantly ($p<0.01$) effect on soil moisture except for plot A and B in August 2002. Semivariogram analysis demonstrated that harvesting modified spatial heterogeneity in soil moisture. Our two years (total four times) research indicated that, harvesting decreased the means of nugget and sill. Means of structural ratio (C/C_0+C) declined with increasing the harvesting intensity. However, range was not related to harvesting intensity. In the first year following harvesting, ranges in the spring were less than those in the summer both in treatment B and C. In the second year, ranges in the spring were still less in treatment C but greater in treatment B. Spatial heterogeneity in soil moisture was mainly caused by spatial autocorrelation ($>50\%$) in all plots. However, harvesting tended to decrease the structural variance ratio. Comparing spatial patterns in topsoil moisture among three plots, harvesting changed their spatial patterns. In a forest ecosystem with strong spatial pattern, harvesting tended to reduce its pattern strength and have a larger impact on topsoil moisture in spring than in summer. We also found that harvesting resulted in spatial patchiness more fragmented in spring and homogenized the spatial distribution of topsoil moisture in summer.

Key words: soil moisture; spatial heterogeneity; harvesting; geostatistics; secondary forests

土壤水分具有空间和时间上的异质性^[1~4]。在不同的空间尺度上,土壤水分受到影响的因子有所不同。在较大的空间尺度上,土壤含水量主要受大气降水、地形等因子的控制;在较小的尺度上,主要受土壤特性、植被分布、微立地以及(人为和自然)干扰的影响^[5, 6]。降水的季节变化、植物的季节生长和根系吸收等,常常导致土壤水分在时间上的变异性^[7, 8],而植被的垂直结构、植株的疏密程度又影响降雨的空间分配。近年来,国内外对不同生态系统内影响土壤水分空间和时间异质性的因子进行了大量研究,如森林^[9, 10]、草地^[11, 12]、沙地^[13~15]、农田^[16~18]以及小流域^[19~21]等,对认识不同群落和土地利用方式土壤水分格局与动态具有重要意义。然而,这些研究并没有充分探讨干扰(尤其是人为干扰)对土壤水分空间异质性的影响。

干扰是导致生态系统空间异质性存在的重要因子^[22]。土壤表层水分由于受其理化特性、地被物和根系的影响,对外界的干扰反应尤为敏感^[6]。在未受人为干扰的林分中,由于林冠结构、林下植被盖度、枯落物薄厚和根系密度等的差异,土壤水分也存在空间异质性特征,形成大小不同的水分斑块,人为(对林分)的干扰则改变了原来土壤水分空间格局与过程^[23]。林分干扰初期,很可能引起土壤水分空间异质性特征的明显改变,随着植被层的恢复,土壤水分的空间异质性和格局将发生怎样的变化?土壤水分空间异质性的发展是否与干扰强度有关?不同强度的干扰对土壤水分空间格局的影响是否有所差别?目前,对该问题探讨较少。为此,我们通过对天然次生林进行不同强度的采伐干扰试验,采用地统计学的方法,在连续两年的春季和夏季两次取样,研究采伐干扰对土壤表层(3~5cm)水分空间异质性的影响,跟踪土壤表层水分空间格局变化,为深刻理解土壤与植被之间复杂关系提供科学的依据。

1 材料与方法

1.1 研究地自然概况

研究地设在东北林业大学帽儿山实验林场尖岭沟森林培育实验站(127°30′~127°34′E, 45°21′~45°25′N)。该区为低山丘陵,属温带大陆性季风气候。年平均气温 2.8℃,1 月份平均温度 -19.6℃,7 月份平均温度 20.9℃。年平均降水量 723mm(其中 6~8 月份降水 347mm,占全年降水 48%),年平均蒸发量 1094mm。样地海拔高 340m,地形平缓。土壤为暗棕壤,平均土层厚度 40~50cm,其中腐殖质层厚度 10cm 左右。

帽儿山地区的地带性植被为原始阔叶红松林,目前是遭破坏后形成的天然次生林,林分平均年龄 70~80a,平均高 24.6m。试验地林分冠层主要树种为水曲柳(*Fraxinus mandshurica*)。其它树种有黄菠萝(*Phellodendron amurense*)、胡桃楸(*Juglans mandshurica*)、山杨(*Populus davidiana*)、白桦(*Betula platyphylla*)、和色木槭(*Acer mono*)等。灌木树种以暴马丁香(*Syringa amurensis*)、早花忍冬(*Lonicera praeflorens*)、瘤枝卫矛(*Evonymns pauciflorus*)等为主。草本植物主要为木贼(*Hippochaete hymale*)、毛缘苔草(*Carex campylorhina*)、铃兰(*Coovallaria keiskei*)等。

1.2 样地设置及空间取样

2001 年 5 月上旬进行了野外踏查,秋季进行林分基本状况调查,在同一林分中设置 50m×50m 试验地 3 块(相距 10~15m),每块周围均设置宽度为 10m 的缓冲区。其中样地 A 没有进行采伐干扰,作为对照,样地 B 按胸高断面面积的 50%随机伐除

乔木,并清除大的灌木,样地 C 采取皆伐处理。依据地统计学理论及空间格局分析的取样方法^[24],首先在每块试验地内设置规则(4m×4m)的取样点,然后随机选取 2 个 8m×8m 的小样方,在其内布设 2m×2m、1m×1m 和 0.5m×0.5m 的格子样方,在网格线的交叉点处间隔取样。样地 A 内布设不同间隔距离的样点共计 160 个,样地 B、C 内取样位置相同,共计 154 个(图 1)。

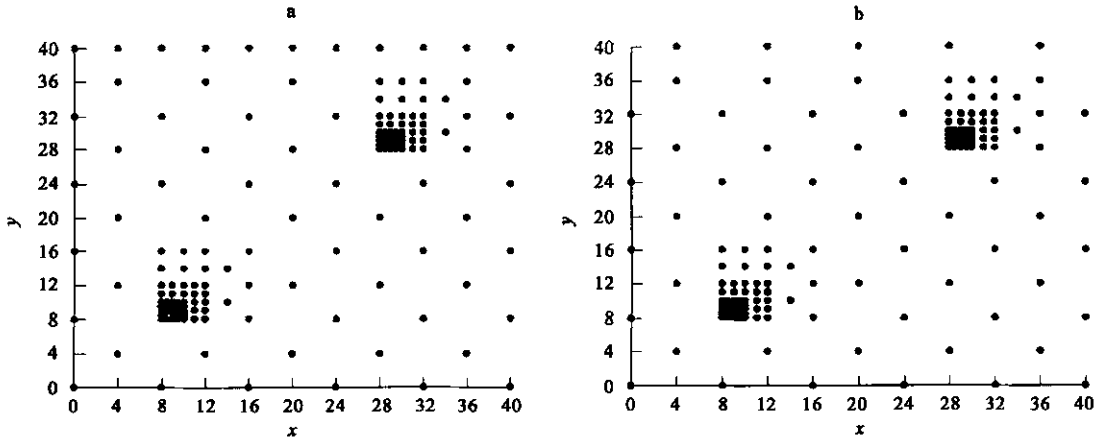


图 1 对照样地 A(a),采伐 50%样地 B 和皆伐样地 C(b)内取样位置图,x 轴和 y 轴为样地边界(m)

Fig. 1 Diagram of point locations sampled in the three sites. a for plot A (control), b for plot B (cut 50%) and plot C (cut 100%), x and y axes express plot boundary, the unit of length is meter

1.3 土壤表层水分的测定

本次研究中,采用烘干法进行土壤水分含量的测定。为了便于分析比较,减少其他环境因子的影响,选择在雨后至少 3~4d 的晴天进行采样。土壤表层水分测定的取样时间分别为 2002 年的 5 月 22 日、8 月 28 日;2003 年的 6 月 1 日、8 月 26 日。土壤取样时,先除去表层枯枝落叶,然后在 3~5cm 深的土层内用土壤钻(直径=4cm)取样,样品重量大约 25g,剔除明显的植物根段和枯落物等杂质,装入编号的铝盒中,带回实验室。称重后的土壤样品(精确到 0.01g),在 105℃ 的烘箱内烘至 12h,取出后称重,计算土壤水分含量^[25]。

1.4 数据分析

采用经典的统计方法计算出每块样地各次取样的土壤水分平均值、方差和变异系数,用此来衡量各样地的土壤水分平均状况和总变异程度。在方差分析的基础上,利用多重比较的方法(LSD),检验各样地之间土壤水分平均状况的差异。对每次获得的土壤水分含量和空间位置数据,用变异函数 $\gamma(h)$ 分析方法建立变异函数理论模型。变异函数的计算公式如下:

$$\gamma(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^N [z(x_i) - z(x_i + h)]^2$$

式中, $\gamma(h)$ 是变异函数, Z 为区域化随机变量, $Z(x_i)$ 和 $Z(x_i + h)$ 分别为变量 Z 在空间位置 x_i 和 $x_i + h$ 上的取值, $N(h)$ 是取样间隔为 h 时的样本对总数^[26]。本文所有变异函数均拟合成球状理论模型(Spherical model),计算可得到 4 个重要的参数,即基台值 $C_0 + C(\text{Sill})$ 、块金值 $C_0(\text{Nugget})$ 、结构方差比 $C/(C_0 + C)$ (Structural variance ratio)和变程 $a(\text{Range})$ 。基台值表示变量的最大变异程度,可用来衡量空间异质性程度,块金值表示区域变量在小尺度上的非连续变异,主要来源小于抽样尺度的随机变异和测量误差,结构方差比则可用来衡量空间自相关因素对变量总变异的影响程度,变程为研究变量存在空间自相关特性的平均最大距离。变异函数计算的步长选择以实际取样的距离和样点对之间的平衡为基础,步长变化范围为 0.5~30m,样点对数目最小为 80,最大为 2769,平均值大于 970。通过变异函数模型参数,可以比较林分在不同强度干扰情况下,土壤表层水分空间异质性特征。使用块段克立格(Block kriging)空间局部插值方法估计、模拟和比较土壤表层水分的空间分布特征。

2 结果与分析

2.1 土壤表层水分统计分析

统计结果表明(表 1),不同干扰强度对土壤表层水分含量有明显影响。在观测的两年里,样地 A(对照)、B(采伐 50%)内土壤表层(3~5cm)水分平均含量的波动范围分别为 55.30%~62.14%和 51.52%~59.68%;而皆伐样地 C(采伐 100%)水分含量相对较低,波动范围为 48.44%~57.88%。没有干扰的样地(A),平均极差最大(47%),采伐 50%的样地(B)和皆伐(采伐 100%)样地(C)极差相对较小(分别为 31%和 36%)。多重比较(LSD)表明,除 02 年夏季(8 月),采伐 50%的样地(B)与对照样地(A)之间没有显著差异外($p > 0.05$),不同样地之间(包括 2002 年和 2003 年以及春季和夏季)均有显著的差异($p < 0.01$)。没

有采伐干扰的样地(A)土壤表层水分平均含量较高(平均 57.8%),相对湿润;皆伐样地(C)平均含水量多为最低(平均 51.4%);而采伐 50%的样地(B)平均含水量介于二者之间(平均 55.1%)。显然,这与样地内树木采伐强度、草本植物盖度、土壤蒸发的差异有关,同时也表明,样地 A 内较为完整的乔、灌、草的林分垂直结构有利于土壤表层水分的保持。除 2003 年 6 月以外,样地 B、C 内土壤水分均比样地 A(对照)具有相对较低的样本方差和变异系数(表 1)。

表 1 不同采伐干扰样地土壤表层(3~5cm)水分含量(%)描述统计结果

Table 1 Descriptive statistic results of topsoil (3~5cm) moisture (%) in three plot						
取样时间 Sampling time	平均 Mean	方差 Variance	最小值 Minimum	最大值 Maximum	变异系数 CV(%)	样本数 Sample size
样地 A Plot A (Control)						
2002 年 5 月 22 日 May 22 2002	57.70	59.98	36.35	80.68	13.42	160
2002 年 8 月 28 日 August 28 2002	55.30	76.78	19.56	84.31	15.84	160
2003 年 6 月 01 日 June 01 2003	62.14	35.54	36.48	76.19	9.59	160
2003 年 8 月 26 日 August 26 2003	56.08	45.31	36.88	75.00	12.00	160
平均 Mean	57.81	54.40	31.98	79.04	12.71	
样地 B Plot B (Cut 50%)						
2002 年 5 月 22 日 May 22 2002	59.68	31.79	48.29	73.46	9.45	154
2002 年 8 月 28 日 August 28 2002	54.88	21.22	43.67	65.31	8.39	154
2003 年 6 月 01 日 June 01 2003	54.26	77.21	20.00	75.81	16.19	154
2003 年 8 月 26 日 August 26 2003	51.52	18.33	42.18	64.15	8.31	154
平均 Mean	55.08	31.14	38.53	69.68	10.58	
样地 C Plot C (Cut 100%)						
2002 年 5 月 22 日 May 22 2002	49.59	23.89	33.96	61.67	9.85	154
2002 年 8 月 28 日 August 28 2002	48.44	31.49	32.91	67.39	11.58	154
2003 年 6 月 01 日 June 01 2003	57.88	97.24	29.17	79.31	17.24	154
2003 年 8 月 26 日 August 26 2003	49.83	23.37	34.24	66.29	9.70	154
平均 Mean	51.43	43.99	32.57	68.66	12.09	

2.2 土壤表层水分变异函数分析

采伐干扰对林分表层土壤水分空间分布具有重要影响,在采伐后的 2002 年春季和夏季,采伐样地(B、C)和对照样地(A)水分含量的变异函数曲线(图 2a₁~c₄)和参数(表 2)显著不同。与未采伐干扰的林分块金值(C₀)和基台值(C₀+C)相比(样地 A, C₀:18~27, C₀+C:62~79),采伐 50%(样地 B, C₀:9~10, C₀+C:22~35)和采伐 100%(样地 C, C₀:7~15, C₀+C:24~34)的块金值和基台值均较小,但是,变程(a)相对较大(样地 A:4~8m,样地 B:8~14m,样地 C:9~13m)。可见,采伐干扰导致基台值减小和变程增大,空间异质性程度降低,土壤水分空间分布趋于均匀化。

2003 年春季,采伐干扰 50%(样地 B)和 100%(样地 C)的块金值(分别为 21.6,25.9)和基台值(分别为 78.5,112.8)明显高于对照样地(A, C₀:7.7, C₀+C:53.19)(表 2),但是变程(样地 B 为 23.8m, C 为 10.4m)小于未采伐干扰的样地(A 为 25.2m)。2003 年夏季,样地 B 和 C 内土壤表层水分的块金值和基台值则都比对照样地 A 小,但是变程差异不大(表 2)。干扰后的 2a 中,采伐样地(B 和 C)土壤表层水分的基台值、块金值和变程与对照样地(A)内的差异,并没有随采伐强度而发生单调增减(表 2)。

干扰改变了表层水分的空间异质性组成。在 2002 年,采伐 50%和采伐 100%的样地(B, C)的年平均结构方差比(C/C₀+C 均为 0.62)低于对照样地(A, C/C₀+C 为 0.68),2003 年的年平均结构方差比的差异尤为明显(样地 A, B, C 分别为 0.81, 0.71, 0.63),随机方差所占的比例(C₀/C₀+C)随采伐强度的增加而增大。

2.3 土壤表层水分空间分布格局

空间异质性与空间格局有密切联系^[10, 22, 27]。采伐干扰对土壤表层水分空间异质性的影响必然引起空间格局的改变。通过克立格法制图(Kriging map)分析(图 3),有助于进一步了解土壤水分空间分布格局的特征。本研究将土壤表层水分含量划分为 7 个等级(a~g)。2002 年春季,对照样地(A)土壤表层水分含量较高的斑块(图 3a₁, 等级 a~b, >60%)只有 2 个,面积占 6%左右,斑块呈聚集分布,而水分含量中等的斑块(等级 c~d, 60%~50%)占较大面积(80%左右),格局强度大。采伐干扰 50%的样地(图 3b₁),斑块明显破碎化,土壤表层水分较高的斑块等级(等级 a~b, >60%)达到 6 个,面积约占 30%,斑块呈均匀分布。采伐干扰 100%的样地(图 3c₁),在水分含量相对较低的大斑块(等级 e, 45%~50%)上,均匀分布着较干燥的小斑块(等级 f~g, 35%~45%),采伐样地 B 和 C 内水分空间格局强度均较弱。在 2002 年夏季,对照样地(A)基本上还维持着春季的空间格局(图 3a₂),采伐干扰 50%(B)和 100%的样地(C)均以水分含量中等的(等级 c~d, 50%~60%)大斑块为主(图 3b₂, c₂)。在 2003 年,

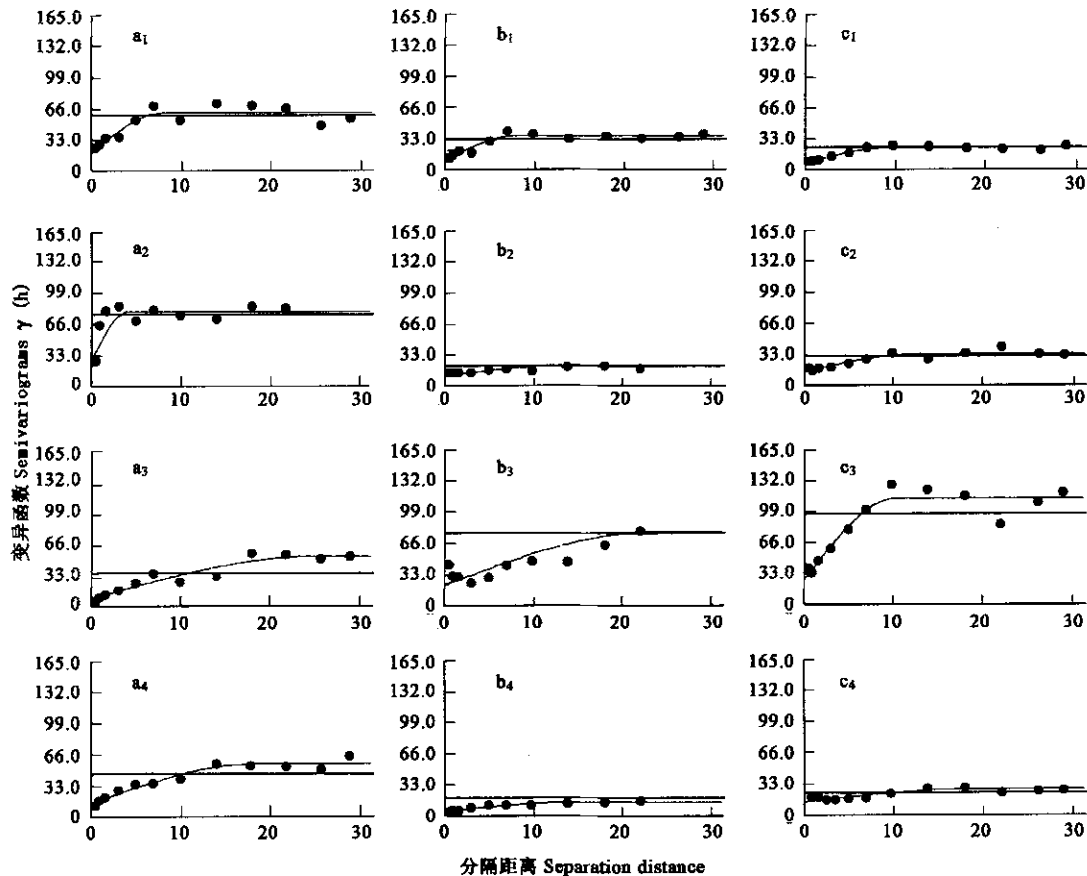


图 2 土壤表层水分变异函数图

Fig. 2 Semivariograms for topsoil (3~5cm) moisture in three plots

$a_1 \sim a_4$ 、 $b_1 \sim b_4$ 、 $c_1 \sim c_4$ 分别表示不同取样时期样地 A(对照)、B(采伐 50%)、C(皆伐)的土壤水分变异函数曲线 indicate the semivariograms for topsoil(3~5cm) moisture in plots A(control),B(cut 50%) and C(cut 100%)respectively at different sampling time;其中 1~4 分别代表 2002 年的春、夏和 2003 年的春、夏季节 Number 1~4 represent the season spring and summer of 2002 year and same as 2003 year

表 2 各样地土壤表层水分含量变异函数的参数

Table 2 Parameters of semivariogram for topsoil (3~5cm) moisture in three plots

样地 Plot	日期 Date	模型 Model	块金值 Nugget(C_0)	基台值 Sill($C+C_0$)	变程 Range(a)	结构方差比 Proportion $C/(C+C_0)$	决定系数 R^2
样地 A	2002-05-22	Sph	18. 60	62. 12	8. 00	0. 70	0. 82
Plot A	2002-08-28	Sph	27. 40	79. 12	4. 00	0. 65	0. 57
(control)	2003-06-01	Sph	7. 70	53. 19	25. 20	0. 86	0. 91
	2003-08-26	Sph	13. 70	56. 37	17. 80	0. 76	0. 93
	平均 Mean		16. 85	62. 79	13. 75	0. 74	
样地 B	0220-05-22	Sph	9. 64	35. 77	8. 00	0. 73	0. 91
Plot B	2002-08-28	Sph	10. 50	22. 00	14. 56	0. 52	0. 77
(cut 50%)	2003-06-01	Sph	21. 60	78. 50	23. 80	0. 73	0. 71
	2003-08-26	Sph	4. 56	14. 34	15. 48	0. 68	0. 90
	平均 Mean		11. 57	37. 65	15. 46	0. 66	
样地 C	2002-05-22	Sph	7. 52	24. 05	9. 50	0. 69	0. 95
Plot C	2002-08-28	Sph	14. 97	34. 02	13. 50	0. 56	0. 86
(cut 100%)	2003-06-01	Sph	25. 90	112. 80	10. 38	0. 77	0. 88
	2003-08-26	Sph	13. 44	26. 89	19. 20	0. 50	0. 74
	平均 Mean		15. 45	49. 44	13. 15	0. 63	

C: 结构方差 structural variance; Sph: 球状模型 spherical model

除了样地 C 在春季(图 3c₃)具有较强的空间格局外,各样地春、夏季土壤水分的空间格局(图 3a₃,b₃,a₄~c₄)都相对较弱。从格局稳定性来看,对照样地 A 内土壤水分空间格局保持最好,同年春、夏季的格局特征更为接近。采伐干扰样地上(B、C)土壤水分的空间分布在同年的春、夏季有所不同(图 3),但在 2003 的夏季与 2002 年同期具有一定程度的相似性(图 3b₂与 b₄;c₂与 c₄)。

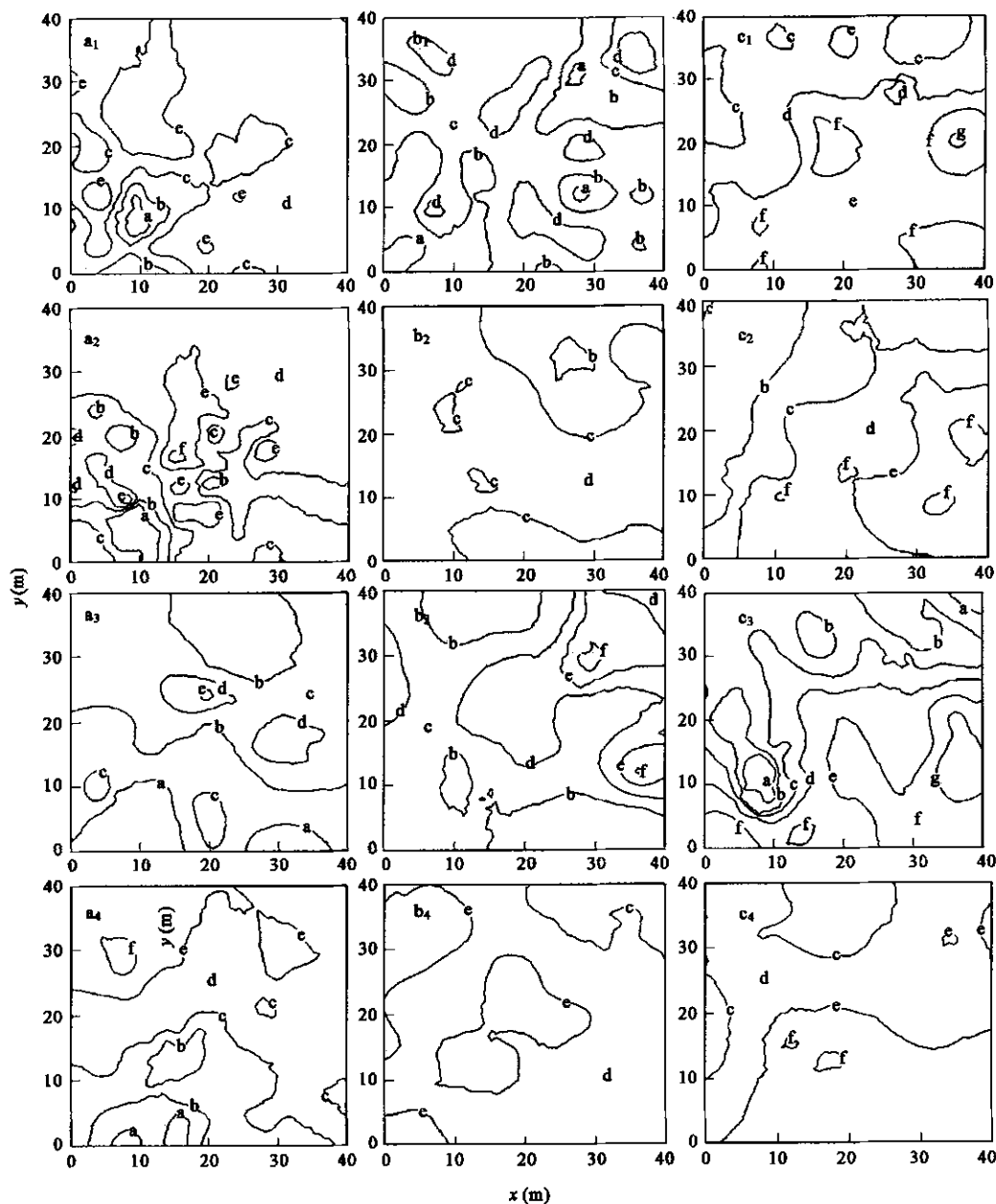


图 3 土壤表层水分空间分布格局

Fig. 3 Spatial patterns for topsoil(3~5cm) moisture in three plots

$a > 65$ $b > 60$ $c > 55$ $d > 50$ $e > 45$ $f > 40$ $g \leq 40$; x 轴和 y 轴为样地边界(m); a₁~a₄, b₁~b₄, c₁~c₄ 分别表示不同取样时期样地 A(对照)、B(采伐 50%)、C(皆伐)的土壤表层水分克里格图;其中 1~4 分别代表 2002 年的春、夏和 2003 年的春、夏季节 a, b, c, d, e, f, g indicate different levels of soil moisture percent, x and y axes express plot boundary, the unit of length is meter; a₁~a₄, b₁~b₄, c₁~c₄ indicate the kriging maps for soil surface moisture in plots A(control), B(cut 50%) and C(cut 100%) at different sampling time. Number 1~4 represent the season spring and summer of 2002 year and same as 2003 year

3 讨论

3.1 干扰对土壤水分平均状况的影响

在植物群落中,植物与土壤资源之间相互作用是生态系统过程的重要内容^[28]。一方面,植物通过生理或形态上的可塑性对

土壤资源的异质性做出响应^[29],另一方面,也借助树种特性、树冠覆盖(如遮荫、截流或径流)、根系吸收、演替等途径来影响土壤资源异质性的发展^[30~32]。在本试验中,采伐干扰改变了林分内植被原有的水平和垂直方向上的结构,直接影响生态因子的重新分配,导致土壤表层水分平均含量的改变。研究表明,对照样地(A)在观测的2年里,土壤表层水分平均含量较高,土壤环境相对湿润(表1)。皆伐样地(C)由于地上植被层的移出,失去了原来林木的庇荫作用,太阳净辐射增强、地表温度升高、水分蒸发加剧,导致其土壤表层水分平均含量偏低^[33]。但随着地被物层的植物逐渐恢复(如草本植物的侵占和木本植物伐桩上大量萌生枝条的伸展),提高了地表的植被盖度,降低了蒸发强度,因此,皆伐样地(C)第2年的土壤水分含量比第1年同期稍高(表1)。采伐干扰的50%样地(B),由于部分林木、树冠覆盖、地表植被得以保留,土壤水分平均含量因此处于样地A和样地C之间。以上结果同其他研究者的结论相一致^[23]。

同时期比较,土壤表层水分含量的样本方差和变异系数的关系为:对照样地A>部分采伐样地B>皆伐样地C(2003年6月除外,这可能与土壤蒸发有关),对照样地土壤水分总变异更大,与Guo等^[23]的研究结果相反。分析原因很可能在于,他们研究的林分为湿地松(*Pinus elliottii* Engelm.)人工纯林,林分内树木的年龄、林木的空间分布、林分水平和垂直结构都相对均一,这种均匀分布的格局,可能是未干扰林分土壤水分样本方差和变异系数较低的重要原因。人为的干扰(皆伐和环割处理)打破了原来接近同质的人工林环境,增加了林分和土壤水分的异质性程度^[23, 34]。本研究的天然次生林,林分组成复杂,主林层下多灌木和草本植物,且呈不均匀分布,导致土壤水分方差和变异系数较高。采伐干扰处理的结果(尤其是皆伐),导致林地覆盖不均匀程度降低或去除,不同空间位置上土壤表层水分含量差异性减小。可见,采伐干扰对林地水分的影响与群落内原来植被的组成结构和分布特征有关。

3.2 干扰对土壤水分空间异质性的影响

林分的采伐干扰主要是改变了林分结构和覆盖物的分布^[23]。在群落尺度上,干扰常导致某些生态系统空间异质性的程度降低^[35, 36],从对照样地(A)与其它两块受干扰样地(B和C)的整个2002年和2003年夏季的数据比较可知(表2),干扰确实降低了土壤表层水分空间异质性(图3a₁~c₂,图3a₄~c₄)。但是,在2003年春季,两块受干扰样地(B,C)的基台值明显大于对照样地(A),而且干扰越强,基台值越高(表2,图3b₃,图3c₃)。主要原因是采伐干扰后林地灌木和草本植物迅速恢复,新生长的伐桩萌条、灌木和草本植物呈斑块状分布(样地C春季的变程:10m,远小于同期样地A的变程:25m)。另外,帽儿山地区春季降雨量很少(2003年5月总降雨量38mm),加之表层土壤蒸发强烈(受春季季风影响),有无植物覆盖则严重影响土壤水分的分布和散失过程。由于干扰对生态系统过程来讲是一个突发事件^[37],因此,采伐干扰有导致结构方差比减小,随机方差比增加的趋势(表2)。

干扰对空间异质性尺度有重要影响^[22],这在变异函数曲线图(图2)中表现得尤为突出。干扰导致2002年采伐样地上土壤水分的平均变程(B:11.3m,C:11.5m)比对照样地(A:6m)大,但2003年比对照样地的平均变程小(表2),说明采伐后第1年控制土壤水分空间分布的一些因子(如植物的覆盖和根系吸收)在第2年可能发生了变化。在2002年春季到夏季,对照样地(A)的变程(8m→4m)在减小,而干扰50%的样地(B)和皆伐样地(C)的变程在增加(分别为8m→14.56m,9.5m→13.5m)(表2)。而在2003年春季到夏季,样地B变程(23.8m→15.5m)与样地A变程(25.2m→17.8m)变化规律一致。而样地C仍保持2002年的变化规律,春季变程(10.4m)相对较小,夏季变程(19.2m)相对较大。干扰50%的样地B和皆伐样地C变程在2003年出现的变化,反映干扰强度(采伐50%与采伐100%)的差异对土壤表层水分空间异质性的影响不同,水分的空间变异是多因素调控的过程^[6]。植被的种类、盖度和空间分布等因素的差别以及这些因素的季节性变化,对植物群落内土壤表层水分变异尺度有重要影响^[11]。

3.3 干扰对土壤水分空间格局的影响

在生态系统中,空间异质性导致空间格局的存在,空间格局是空间异质性的具体表现^[24, 38]。树木可以增加土壤资源异质性的程度,有无林木直接影响水分的空间格局。对于原来空间异质性强的系统,干扰降低了空间格局的强度,导致样地A、样地B和样地C之间在空间格局上的差别(图3)。如果林分结构和林地条件没有改变,土壤表层水分的空间格局应相似。因此,未受采伐干扰的对照样地(A),春季和夏季的空间格局差别不大(如图3a₁,a₂之间以及图3a₃,a₄之间)。但是,干扰的样地(B,C),春季的格局(图3b₁,c₁,b₃,c₃)比夏季的格局(图3b₂,c₂,b₄,c₄)明显的破碎化。帽儿山地区春季土壤水分的来源主要是冬季降雪的融化和土壤解冻,而夏季土壤水分主要来自于降雨。采伐干扰样地(B)和皆伐样地(C)夏季降水分配趋于均匀,这可能是样地B和样地C夏季空间格局有别于春季的主要原因。样地C内土壤水分在2003年春季格局较强(图3c₃),可能是皆伐样地土壤水热条件适宜,迅速生长草本植物和灌木、不同空间位置上丛生草本和灌木覆盖地表,影响土壤水分春季散失所致。

采伐干扰对土壤水分空间动态的影响是一个复杂的生理生态过程,干扰改变了各样地之间地表蒸发、植物生长、根系吸收、植株疏密程度和降水分配方式等特征。空间格局对干扰的反应不仅取决于对林分的干扰强度,还取决于系统本身对干扰的抗性大小和恢复能力。随着干扰之后的恢复过程,采伐干扰样地土壤表层水分空间格局与未干扰样地之间的差别可能会减小,但这

需要进行长期和深入研究。

4 结论

4.1 采伐干扰对森林土壤表层水分含量有明显影响。采伐干扰的样地土壤表层平均水分含量低于未干扰的对照样地,采伐干扰越强,水分含量相对越低,主要原因是采伐干扰改变了原有的林地环境。对照样地 A 内土壤水分比采伐 50%样地 B 和皆伐样地 C 具有相对较高的样本方差和变异系数。

4.2 采伐干扰对林分表层土壤水分空间异质性有重要影响。采伐干扰样地与对照样地之间的变异函数曲线显著不同。两年春季和夏季 4 次取样结果表明,采伐干扰导致平均块金值和基台值降低,平均结构方差比随着采伐强度的增大而减小,变程则不随采伐强度增大而改变。

4.3 采伐干扰对土壤表层水分空间异质性的影响引起空间格局的改变。这种影响在春季和夏季有明显不同,干扰样地春季格局比夏季格局明显破碎化。对于原来空间格局较强的系统,干扰有降低空间格局强度的作用。干扰对春季土壤表层水分空间格局的影响明显大于夏季。

References:

- [1] Robertson G P, Huston M A, Evans F C, *et al.* Spatial variability in a successional plant community: pattern of nitrogen availability. *Ecology*, 1988, **69**(5): 1517~1524.
- [2] Mohanty B P, Skaggs T H and Famiglietti J S. Analysis and mapping of field-scale moisture variability using high-resolution, ground-based data during the Southern Great Plains 1997 (SGP1997) Hydrology Experiment. *Water. Resour. Res.*, 2000, **36**(4): 1023~1031.
- [3] Sarah E J, Pärtel M, Wilson S D, *et al.* Temporal heterogeneity of soil moisture in grassland and forest. *J. Ecol.*, 2003, **91**: 234~239.
- [4] Zhou Q Y, and Shimada J. Temporal stability of the spatial distribution pattern of soil water. *Acta Pedologica Sinica*, 2003, **40**(5): 683~690.
- [5] Entin J K, Robock A, Vinnikov K Y, *et al.* Temporal and spatial scales of observed soil moisture variations in the extratropics. *J. Geophys. Res.*, 2000, **105**(D9): 11865~11877.
- [6] Mohanty B P, Famiglietti J S and Skaggs T H. Evolution of soil moisture spatial structure in a mixed vegetation pixel during the Southern Great Plains 1997 (SGP1997) Hydrology Experiment. *Water. Resour. Res.*, 2000, **36**(12): 3675~3686.
- [7] Farley R A, and Fitter A H. Temporal and spatial variation in soil resources in a deciduous woodland. *J. Ecol.*, 1999, **87**: 688~696.
- [8] He Q H, H Y H, Bao W K. Research on dynamics of soil moisture in arid and semiarid mountainous areas. *Journal of Mountain Science*, 2003, **21**(2): 149~156.
- [9] Stoyan S H, De-polli H and Böhm S, *et al.* Spatial heterogeneity of soil respiration and related properties at the plant scale. *Plant Soil*, 2000, **222**: 203~214.
- [10] Wang Z Q, and Wang Q C. The spatial heterogeneity of soil physical properties in forests. *Acta Ecologica Sinica*, 2000, **20**(6): 945~950.
- [11] Kleb H R, Wilson S D. Scale of heterogeneity in prairie and forest. *Can. J. Bot.*, 1999, **77**: 370~376.
- [12] Bai Y F, Xu Z X, Li D X. On the small scale spatial heterogeneity of soil moisture, carbon and nitrogen in *Stipa* communities of the Inner Mongolia Plateau. *Acta Ecologica Sinica*, 2002, **22**(8): 1215~1223.
- [13] Cain M L, Subler S, Evans J P, *et al.* Sampling spatial and temporal variation in soil nitrogen availability. *Oecologia*, 1999, **118**: 397~404.
- [14] Zhao W Z. Impact of plantation on spatial heterogeneity of soil moisture in Horqin sandy land. *Acta Pedologica Sinica*, 2002, **39**(1): 113~119.
- [15] Chen F S, Zeng D H, Chen G S, *et al.* Comparative analysis on spatial patterns of soil moisture under different land use types in Kerqin sandy land. *Chinese Journal of Ecology*, 2003, **22**(6): 43~48.
- [16] Gong Y S, Liao C Z, Li B G. Spatial variability and fractal dimension for soil water content and bulk density. *Acta Pedologica Sinica*, 1998, **35**(1): 10~15.
- [17] Li J X, Wan Z H. Microclimate effect and soil moisture change of popular-wheat intercropping systems in Huaibei Plain. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2002, **13**(4): 390~394.
- [18] François A, Mathieu R, Parent L, *et al.* Geostatistics of near-surface moisture in bare cultivated organic soils. *J. Hydrol.*, 2002, **260**: 30~37.
- [19] Western A W, Blöschl G, Grayson R B. Geostatistical characteristic of soil moisture patterns in Tarrawarra catchment. *J. Hydrol.*, 1998, **205**: 20~37.

[20] Western A W, Zhou S L, Grayson R B. Spatial correlation of soil moisture in small catchments and its relationship to dominant spatial hydrological process. *J. Hydrol.*, 2004, **286**9: 113~134.

[21] Qiu Y, Fu B J, Wang J, *et al.* Spatial heterogeneity of soil moisture content of the Loess Plateau, China and its relation to influencing factors. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2001, **12**(5): 715~720.

[22] Li H B, Reynolds J F. On definition and quantification of heterogeneity. *Oikos*, 1995, **73**: 280~284.

[23] Guo D L, Mou P, Jones R H, *et al.* Temporal changes in spatial patterns of soil moisture following disturbance: an experimental approach. *J. Ecol.*, 2002, **90**: 338~347.

[24] Wang Z Q. *Geostatistics and Its Application in Ecology*. Beijing: Science Press, 1999. 96~100.

[25] Determination of forest soil water content. In: Liu G S. *Soil physical and chemical analysis description of soil profile*. Beijing: Standard Press of China, 1996. 121~135.

[26] Gonzalez O J, Zak D R. Geostatistical analysis of soil properties in a secondary tropical dry forest, St. Lucia, West Indies. *Plant Soil*, 1994, **163**: 45~54.

[27] Xiao D N, Bu R C, Li X Z. Spatial ecology and landscape heterogeneity. *Acta Ecologica Sinica*, 1997, **17**(5): 453~461.

[28] Hutchings M J, John E A, Wijesinghe D K. Toward understanding the consequences of soil heterogeneity for plant populations and communities. *Ecology*, 2003, **84**(9): 2322~2334.

[29] Mou P, Mitchell R J, Jones R H. Root distribution of two tree species under a heterogeneous nutrient environment. *J. Appl. Ecol.*, 1997, **34**: 645~656.

[30] Finzi A C, Canham C D, Breemen N V. Canopy tree-soil interactions within temperate forests: species effects on pH and Cations. *Ecol. Appl.*, 1998, **8**(2): 447~454.

[31] Schlesinger W H, Raikes J A, Hartlely A E, *et al.* On the spatial pattern of soil nutrients in desert ecosystems. *Ecology*, 1996, **77**(2): 364~374.

[32] Gross K L, Pregitzer K S, Burton A J. Spatial variation in nitrogen availability in three successional plant communities. *J. Ecol.*, 1995, **83**: 357~367.

[33] Kleb H R, Wilson S D. Vegetation effects on soil resource heterogeneity in prairie and forest. *Am. Nat.*, 1997, **150**: 283~298.

[34] Lister A J, Mou P, Jones R H. Spatial patterns of soil and vegetation in a 40-year-old slash pine (*Pinus elliottii* Engelm.) forest in the Coastal Plain of South Carolina, USA. *Can. J. Forest Res.*, 2000, **30**: 145~155.

[35] Dale M R T, Zbigniewicz M W. Spatial pattern in boreal shrub communities: effects of a peak in herbivore density. *Can. J. Bot.*, 1997, **75**: 1342~1348.

[36] Alder P B, Lauenroth W K. Livestock exclusion increases the spatial heterogeneity of vegetaion in the shortgrass steppe, Colorado. *Applied Vegetation Science*, 2000, **3**: 213~222.

[37] Chen L D, Fu B J. Ecological significance, characteristics and types of disturbance. *Acta Ecologica Sinica*, 2000, **20**(4): 581~586.

[38] Chen W B, Xiao D N, Li X Z. The characteristics and contents of landscape spatial analysis. *Acta Ecologica Sinica*, 2002, **22**(7): 1136~1142.

参考文献:

[4] 周启友, 岛田纯. 土壤水空间分布结构的时间稳定性. *土壤学报*, 2003, **40**(5): 683~690.

[8] 何其华, 何永华, 包维楷. 干旱半干旱区山地土壤水分动态变化. *山地学报*, 2003, **21**(2): 149~156.

[10] 王政权, 王庆成. 森林土壤物理性质的空间异质性研究. *生态学报*, 2000, **20**(6): 946~950.

[12] 白永飞, 许志信, 李德新. 内蒙古高原针茅草原群落土壤水分和碳、氮分布的小尺度空间异质性. *生态学报*, 2002, **22**(8): 1215~1223.

[14] 赵文智. 科尔沁沙地人工植被对土壤水分异质性的影响. *土壤学报*, 2002, **39**(1): 113~119.

[15] 陈伏生, 曾德慧, 陈广生, 等. 不同土地利用方式下沙地土壤水分空间变异规律. *生态学杂志*, 2003, **22**(6): 43~48.

[16] 龚元石, 廖超子, 李保国. 土壤含水量和容重的空间变异及其分形特征. *土壤学报*, 1998, **35**(1): 11~15.

[17] 李俊祥, 宛志沪. 淮北平原杨-麦间作系统的小气候效应与土壤水分变化研究. *应用生态学报*, 2002, **13**(4): 390~394.

[21] 邱扬, 傅伯杰, 王军, 等. 黄土丘陵小流域土壤水分的空间异质性及其影响因子. *应用生态学报*, 2001, **12**(5): 715~720.

[24] 王政权. *地统计学及在生态学中的应用*. 北京: 科学出版社, 1999. 96~100.

[25] 森林土壤含水量的测定(GB7837-87). 见: 刘光崧主编. *土壤理化分析与剖面描述*. 北京: 中国标准出版社, 1996. 126~127.

[27] 肖笃宁, 布仁仓, 李秀珍. 生态空间理论与景观异质性. *生态学报*, 1997, **17**(5): 453~461.

[37] 陈利顶, 傅伯杰. 干扰的类型、特征及其生态学意义. *生态学报*, 2000, **20**(4): 581~586.

[38] 陈文波, 肖笃宁, 李秀珍. 景观空间分析的特征和主要内容. *生态学报*, 2002, **22**(7): 1136~1142.