

文章编号: 1008-2786-(2007)6-691-07

应用地统计学方法定量评价森林截留的地理变化规律

洪滔^{1,2}, 吴承祯^{1,2*}, 范海兰¹, 宋萍¹

(1. 福建农林大学林学院, 福建 福州 350002)

(2. 福建省高校森林生态系统过程与经营重点实验室, 福建 福州 350002)

摘要: 收集大量森林生态系统类型林冠截留功能研究资料, 应用地统计学方法模拟了我国主要森林生态系统类型林冠截留的地理变化规律。结果表明: 我国主要森林生态系统类型林冠截留与环境因素经度和纬度之间存在一定的地理变化规律, 地统计学方法模拟的回归优度达 88.15%, 明显优于前人提出的三因素多元地理空间模型的模拟效果 (回归优度为 56.42%), 能更真实反映我国主要森林生态系统类型林冠截留的地理变化规律, 从而为我国主要森林生态系统林冠截留时空分布的模拟与分析提供可靠方法。这些主要森林生态系统包括: 寒温带、温带山地落叶针叶林; 寒温带、温带山地常绿针叶林; 亚热带、热带东部山地常绿针叶林; 亚热带、热带西部山地常绿针叶林; 亚热带西部高山常绿针叶林; 温带山地落叶与常绿针叶林; 温带、亚热带山地落叶阔叶林; 亚热带山地常绿阔叶林; 亚热带山地常绿落叶阔叶混交林; 亚热带竹林; 南亚热带山地季风常绿阔叶林; 热带半落叶季风雨林; 热带山地雨林。

关键词: 林冠截留; 森林生态系统; 地理变化; 地统计学

中图分类号: S715.2

文献标识码: A

森林生态系统是陆地上最大的生态系统, 森林的水文学效应是森林生态系统最重要的生态学功能之一, 因此, 一直是森林生态学研究的重点内容。国外在这一领域的研究开展较早, 我国森林水文学的研究始于 20 世纪 50 年代。随着我国森林生态系统定位研究工作的开展, 森林水文学研究得到迅速发展。由于森林生态系统水文生态效能是森林公益效能的一个主要方面, 因此分析各种森林生态系统水文生态功能的地理变化规律是揭示森林水文生态规律、评价森林水文公益效能的基础。温远光等^[1]曾建立了我国主要森林生态系统类型林冠截留及森林截持降水的综合调节能力的三因素多元地理空间模

型; 王兵等^[2]利用最小二乘法建立了全国年均降水量、林冠降水截留量、枯落物持水量等森林水文要素与地理要素 (经度、纬度、海拔) 之间的函数关系, 但是由于森林水文要素数据地理变化的复杂性, 导致这些模型的模拟精度均不高, 是否存在更好的模拟方法值得探讨。本文通过收集我国主要森林生态系统水文生态功能资料, 应用地统计学方法分析了我国主要森林生态系统林冠截留地理变化规律, 从而为全国森林生态系统水文生态功能规律分析提供新方法 with 手段, 为科学合理经营防护林与利用水资源、充分发挥森林的水文生态功能提供理论基础。

收稿日期 (Received date): 2007-04-28; 改回日期 (Accepted): 2007-08-11.

基金项目 (Foundation item): 国家自然科学基金资助项目 (30671664)、福建省科技厅重大项目 (2001F007)、福建省自然科学基金项目 (B0110026) 资助。[Supported by the National Natural Science Foundation of China and the Key Project of the Provincial Science and Technology Department of Fujian and the National Natural Science Foundation of Fujian, China (30671664, 2001F007, B0110026)]

作者简介 (Biography): 洪滔 (1978-), 男 (汉), 福建福州人, 讲师, 主要从事森林生态学研究。[Hong Tao (1978-), Male, Born in Fujian, Lecturer, majors on Forest Ecology.]

* 通讯作者 Corresponding author

© 1994-2011 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. <http://www.cnki.net>

1 地统计学方法

地统计学^[3-9] (Geostatistics, 又称地质统计学) 是近 30 多年来创立起来的一门新兴边缘学科, 是在用经典统计学研究地学问题时遇到矛盾的过程中产生与发展起来的。其与经典统计学相比, 具有如下优点: 充分利用各种信息; 插值方法是一种无偏的最优估值方法等。

1.1 Matheron 区域变量理论

从数学上来说, 森林生态系统是一个多变量或矢量域。有些变量可以在连续尺度上测定, 而另一些变量则可能是离散的。实际的森林生态系统截留量现状调查, 由于工作量和经费关系, 都只有在一定量的离散点上观测主要森林生态系统林冠截留。因此, 应在森林生态系统林冠截留量现状调查的基础上, 建立主要森林生态系统林冠截留的地理变化规律模型, 以估计和判断没有观察和调查到的区域的主要森林生态系统林冠截留量、分析全国森林生态系统功能规律并绘制其等值线分布图具有重要的理论价值。一个区域化变量 $Z(x)$ 是一个随机变量, 它是表征某区域内 x 位置上记录的不同的 Z 值, 可以把它视为对区域内某一固定位置 x 上的一个随机变量 Z 。在主要森林生态系统林冠截留的地理变化规律研究中, 可以把在一定位置 $Z(x)$ 上的林冠截留量 Z 设想成是一个点上的截留量 Z , 它是一个区域化变量。对于样本的位置间距矢量 h 来说, 区域化变量增量 $Z(x) - Z(x+h)$ 的方差在区域内是有限的, 而且与位置无关

$$\text{VAR}[Z(x) - Z(x+h)] = E[Z(x) - Z(x+h)]^2 = 2r(h) \quad (1)$$

式中 方差 $2r(h)$ 的 $1/2$ 叫半方差。 $r(h)$ 只依赖于点与点之间的距离 (h) 矢量。

1.2 森林生态系统林冠截留的空间依赖性

实际上可以预测在相同部位 x 上的 Z 值总是比偏离距离 h (即 $x+h$) 的那些部位上的 Z 值相似, 而且, 当 h 增加时, 值之间的差异也随之增加。这种现象说明了这些值在距离上或空间上的依赖性, 这种空间依赖性可以用半方差与偏离间距相对应的相关曲线图量化。这种相关曲线图称为变异函数。

1.3 变异函数

空间依赖性的结构分析可以用变异函数定量。变异函数描述了区域化变量 Z 的空间依赖组

成部分。将给定偏离间距为 h 的半方差估计为所有由间距 h 隔开的观察值之间的半方差平均值

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

式中 有 $N(h)$ 对观察值。变异函数是地统计学的基础, 其精确估计是成功空间内插和栅格地图制作的关键。

1.4 空间内插

在区域化变量理论的基础上, 产生了一组求局部位置移动加权平均值形式的内插法, 最终绘制出区域内主要森林生态系统林冠截留分布图。其中 Kriging 内插法是目前地统计学应用最广泛的内插法。

如利用最简单的点 Kriging 内插去估计任意点 x_0 处的主要森林生态系统林冠截留量的算法如下

$$Z_0 = \lambda_1 Z(x_1) + \lambda_2 Z(x_2) + \dots + \lambda_n Z(x_n) \quad (3)$$

$$\text{或} \quad Z(x_0) = \sum_{i=1}^n \lambda_i Z(x_i) \quad (4)$$

式中 $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n$ 为权重, 它考虑了变异函数中表示的空间依赖性。 Z 值的估计应该是无偏的, 因为

$$\sum_{i=1}^n \lambda_i = 1 \quad (5)$$

估计偏差是最小的, 并可以由下列方程求出

$$\sigma_d^2 = b^T \begin{vmatrix} \lambda \\ \mu \end{vmatrix} \quad (6)$$

此式即为地统计方法的线性系统方程, 由 (6) 式可计算得到权重系数 $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n$ 。式中 b 是被估计点与其他点之间的半方差矩阵; μ 为拉格朗日参数。

2 资料来源

从 20 世纪 50 年代以来, 由于破坏森林随之而来的气候条件变化, 地面无覆被、水土流失、地下水位下降、山泉枯竭、河川水文情势恶化、水旱灾害频繁出现, 世界各国对森林与水的关系开展了大量的研究工作。我国“森林水文学学术讨论会文集”的出版^[10], 标志着我国的森林水文学研究也进入了一个全新的阶段。目前, 有关森林水文学功能研究的森林生态系统类型已有山地雨林、半落叶季雨林、常绿阔叶林、常绿落叶阔混交林、山顶矮林、次生落叶林、落叶松林、日本赤松林、樟子松林、油松林、红松林、冷杉林、云杉林、云南松林、华山松林、桉松混交林、马尾松林、杉木林、金钱松林、黄山松林、柏木林、圆柏林、柳杉林、麻栎林、蒙古栎林、锐齿栎林、辽宁栎

林、茅栗林、硬阔林、白桦林、红桦林、山杨林、枫桦林、桦木林、山柳林、泡桐林、枫香林、檫木林、刺槐林、毛竹林、油茶林等^[1-11]。本文基于这些研究资料, 应用地统计学方法分析我国主要森林生态系统林冠层截留的地理变化规律, 以阐明各类森林生态系统林冠截留的数量特征, 并与温远光等^[1]的研究方法及结果进行比较。

由于数据的非正态分布会使变异函数产生比例效应, 比例效应的存在会使实验变异函数产生畸变, 增大估计误差, 变异函数点的波动增大, 甚至会掩盖其固有的结构, 因此应该消除比例效应^[12]。由于我国主要森林生态系统林冠截留量及生态系统地理位置(经、纬度)数据基本上服从对数正态分布, 上述数据经对数变换后参加计算, 从而消除比例效应。

3 结果与分析

3.1 变异函数

根据(2)式计算在空间上具有滞后 h 的观测值的样本半方差, 在计算中可取 h 的某一范围内 $r(h)$

的平均半方差, 然后将 $(h, r(h))$ 点对值在坐标上绘制散点图, 并用变异函数拟合其关系。我国主要森林生态系统林冠截留的变异函数在 h 大于一定的距离后, 并非呈单调递增, 而是在显示具有一定周期波动时就显示出一种“孔穴效应”, 孔穴效应模型属于线性非平衡性地统计学范畴。在线性非平衡性地统计学中, $m(x)$ 叫漂移, 通常采用多项式形式^[13]。在线性地统计学中, 这种具有复杂变化的区域化变量的空间变异性, 不能用一个简单的理论模型描述, 需要用两个或两个以上的理论模型去描述, 称之为线性地统计学的套合结构。套合结构可以用反映各种不同尺度变化的多个变异函数之和来表示。由于我国主要森林生态系统林冠截留的变异函数存在漂移现象但无断点, 且在不同尺度上变化特征不一样, 因此, 可考虑采用套合结构揭示其不同尺度上的空间变异规律。根据变异函数的变化规律及特征, 将样本的位置间距矢量 h 划分为 8 种不同的尺度。若线性地统计学的套合模型中各子模型均采用多项式模型, 则我国主要森林生态系统林冠截留的变异函数总模型为:

$$\left\{ \begin{array}{ll} r(h) = 0.04585 & h = 0 \\ r(h) = 0.03451 + 2.13093h - 10.85490h^2 - 47.33809h^3 + 118.272h^4 & h \leq 0.11, r = 0.999, n = 179 \\ r(h) = 0.40261 - 2.85542h + 3.80518h^2 + 18.69392h^3 + 72.43036h^4 & 0.11 < h \leq 0.23, r = 0.999, n = 219 \\ r(h) = -29.25386 + 198.2407h + 56.61682h^2 - 2559.175h^3 + 4193.2h^4 & 0.23 < h \leq 0.35, r = 0.926, n = 248 \\ r(h) = 14.30963 - 58.7089h - 29.67341h^2 + 345.6041h^3 - 313.5461h^4 & 0.35 < h \leq 0.47, r = 0.994, n = 184 \\ r(h) = -31.82762 + 141.4347h - 121.9594h^2 - 184.3104h^3 + 237.4936h^4 & 0.47 < h \leq 0.62, r = 0.968, n = 84 \\ r(h) = 32.58176 - 140.0494h + 172.1946h^2 - 3.64322h^3 - 71.91625h^4 & 0.62 < h \leq 0.78, r = 0.600, n = 112 \\ r(h) = 0.35000 & h > 0.78 \end{array} \right.$$

式中 r 为各子模型相关指数; $r(h)$ 为半方差; h 为样本的位置间距矢量, 即经、纬度取对数变换后的样本间距离。区域化变量生态系统截留量 $Z(x)$ 存在着块金效应 ($C_0 = 0.04585$), 它反映了区域化变量 $Z(x)$ 内部随机性的可能程度, 主要由两种来源: 一是来源于区域化变量 $Z(x)$ 在小于抽样尺度 h 时所具有的内部变异, 二是来自抽样分析的误差。对于变异函数的模型而言, 块金效应值 C_0 愈小越好, C_0 愈小, 说明异常值较少, 随机成分的影响较弱, 空间自相关方面的影响加强。区域化变量森林生态系统截留量 $Z(x)$ 块金效应值为 0.04585 说明 $Z(x)$ 的随机性较弱, 具有较强的空间自相关性, 可以应用地统计学方法探讨其空间异质性。而变程 a ($a = 0.35000$) 则反映区域化变量 $Z(x)$ 影响范围的大小, 因此它是区域化变量 $Z(x)$ 空间变异尺度或空间

自相关尺度。在 $|h| \leq a$ 范围内, 区域化变量 $Z(x)$ 是空间自相关的, 即变异函数值与 h 之间存在一定的函数关系, 这种函数关系由变异函数总模型所表达, 超出此范围 ($h > a$) 区域化变量自相关不存在^[14-15]。

3.2 主要森林生态系统林冠截留地理变化规律模拟

利用变异函数总模型计算 47 个主要森林生态系统样点林冠截留测定值间对数变换后半方差 $r(h)$ 值, 把 $r(h)$ 值代入(6)式, 求出各样点权重系数 λ_0 用 $Z(x_0) = \sum_{i=1}^n \lambda_i Z(x_i)$ 对 47 个样点主要森林生态系统林冠截留量进行空间内插, 内插值及误差值列于表 1。并以回归离差平方和 U 占总离差平方和 T 的比值 $C = U/T \times 100\%$ 来衡量模拟精度, 称为回归优度(王学仁, 1980)。

表 1 主要森林生态系统林冠截留地统计学方法与前人方法比较

Table 1 Comparison of rainfall interception of main forest ecosystems between geostatistics method and predecessor's method

森林类型 Forest type	主要森林生态系统 林冠截留量 Canopy rainfall of main forest ecosystem s (mm)	本文方法 Method of this paper		温远光等的方法 Method of W en yuanguang's paper	
		理论值 Theoretic value(mm)	相对误差 Relative error (%)	理论值 Theoretic value(mm)	相对误差 Relative error (%)
落叶松林 <i>Larix gmelinii</i> forest	166.5	154.4	7.31	173.0	3.92
落叶松林 <i>Larix gmelinii</i> forest	118.4	165.9	39.93	172.2	45.41
华北落叶松林 <i>Larix principis-rupprechtii</i> forest	153.8	165.3	7.45	126.4	17.84
油松林 <i>Pinus tabulaeformis</i> forest	117.8	124.8	6.01	129.9	10.26
油松林 <i>Pinus tabulaeformis</i> forest	131.2	124.9	4.81	129.9	1.01
油松林 <i>Pinus tabulaeformis</i> forest	156.9	124.9	20.41	130.0	17.14
油松林 <i>Pinus tabulaeformis</i> forest	94.3	124.8	32.43	130.0	37.86
杉木林 <i>Cunninghamia lanceolata</i> forest	274.2	236.7	13.68	214.7	21.71
杉木林 <i>Cunninghamia lanceolata</i> forest	134.3	178.6	32.99	237.8	77.09
杉木林 <i>Cunninghamia lanceolata</i> forest	198.5	216.6	9.15	232.4	17.06
杉木林 <i>Cunninghamia lanceolata</i> forest	231.5	255.6	10.44	292.3	26.26
杉木林 <i>Cunninghamia lanceolata</i> forest	228.7	208.4	8.91	223.2	2.40
杉木林 <i>Cunninghamia lanceolata</i> forest	143.3	174.7	21.96	239.8	67.71
杉木林 <i>Cunninghamia lanceolata</i> forest	309.0	323.7	4.77	283.8	8.14
杉木林 <i>Cunninghamia lanceolata</i> forest	251.3	258.2	2.73	247.5	1.51
杉木林 <i>Cunninghamia lanceolata</i> forest	279.8	258.2	7.73	247.5	11.54
马尾松林 <i>Pinus massoniana</i> forest	191.8	174.8	8.69	239.8	25.30
马尾松林 <i>Pinus massoniana</i> forest	315.4	280.4	11.09	225.6	28.46
马尾松林 <i>Pinus massoniana</i> forest	442.3	369.5	16.47	304.2	31.22
云南松林 <i>Pinus massoniana</i> forest	98.7	146.6	48.62	196.3	98.91
华山松林 <i>Pinus amandii</i> forest	257.5	165.3	35.82	126.4	50.91
华山松林 <i>Pinus amandii</i> forest	185.2	165.3	10.76	126.4	31.74
华山松林 <i>Pinus amandii</i> forest	132.5	165.2	24.91	126.4	4.45
华山松林 <i>Pinus amandii</i> forest	155.9	165.2	6.00	126.4	18.94
红松林 <i>Pinus koraiensis</i> forest	239.4	165.7	30.79	172.2	28.09
红松林 <i>Pinus koraiensis</i> forest	222.2	254.0	14.31	172.4	22.44
原始红松林 <i>Original Pinus koraiensis</i> forest	169.9	164.2	3.35	170.6	0.42
麻栎林 <i>Quercus aculissina</i> forest	171.7	174.7	1.78	239.8	39.64
锐齿栎林 <i>Quercus aliena</i> forest	140.2	179.4	27.97	126.5	9.77
白栎林 <i>Betula platyphylla</i> forest	156.9	169.4	8.03	173.2	10.40
硬阔林 <i>Hardwood</i> forest	111.3	169.4	52.28	173.2	55.63
栎林 <i>Quercus mongolica</i> forest	157.6	169.4	7.54	173.2	9.91
常绿阔叶林 <i>Evergreen broad-leaved</i> forest	349.3	323.8	7.32	285.2	18.34
常绿阔叶林 <i>Evergreen broad-leaved</i> forest	203.6	255.6	25.57	292.3	43.56
常绿落叶阔叶混交林 <i>Evergreen deciduous broad-leaved</i> forest	202.0	208.3	3.13	223.7	10.76
毛竹林 <i>Phyllostachys pubescens</i> forest	212.0	178.7	15.74	237.9	12.23
毛竹林 <i>Phyllostachys pubescens</i> forest	186.7	258.1	38.28	247.5	32.57
毛竹林 <i>Phyllostachys pubescens</i> forest	224.7	288.8	28.54	230.5	2.60
毛竹林 <i>Phyllostachys pubescens</i> forest	319.5	288.9	9.60	230.5	27.87
半落叶季雨林 <i>Half deciduous seasonal rain</i> forest	529.5	535.9	1.21	386.6	26.99
山地雨林 <i>Mountain rain</i> forest	626.7	535.9	14.49	392.9	37.31
油松林 <i>Pinus tabulaeformis</i> forest	119.6	110.4	7.74	134.3	12.31
山杨林 <i>Populus tremula var davidiana</i> forest	92.5	110.3	19.28	134.7	45.59
松栎混交林 <i>Mixed forest of P. massoniana and S. Superba</i>	439.5	369.5	15.93	305.0	30.60
常绿阔叶林 <i>Evergreen broad-leaved</i> forest	366.9	369.4	0.70	305.0	16.87
杉木林 <i>Cunninghamia lanceolata</i> forest	329.0	294.3	10.55	185.7	43.56
桉松混交林 <i>Mixed forest of Eucalyptus spp. and P. massoniana</i>	152.8	174.7	14.37	239.9	56.98
平均精度 Mean precision (%)	/	/	84.01	/	73.39

由 $T = \sum_{i=1}^n (Z_i - \bar{Z})^2 = 606\ 347\ 30$ $U = T - Q = 534\ 487.01$ 所以回归优度 $C = U/T \times 100\% = 88.15\%$, 相关指数为 0.939 。而用三因素多元地理空间模型研究我国主要森林生态系统林冠截留地理变化规律时,其回归优度仅为 56.42% ,复相关系数为 $0.751\ 1^{[1]}$ 。本文方法回归优度比三因素多元地理空间模型提高了 31.73 个百分点。从表 1 还可以看出,本文所提出的方法模拟精度比用三因素多元地理空间模型明显精度更高,达 84.01% ,提高了 10.62 个百分点,说明在模拟分析我国主要森林生态系统林冠截留的地理变化规律时,地统计学方法明显优于前人提出的三因素多元地理空间模型,它反映出我国主要森林生态系统林冠截留地理变化规律 88.15% 的信息。因此,可以认为我国主要森林生态系统林冠截留与主要环境因子经度和纬度之间存在一定的地理变化规律,且地统计学方法可以应用于分析我国主要森林生态系统林冠截留的地理变化规律,并能实现我国主要森林生态系统林冠截留的空间内插,从而绘制出主要森林生态系统林冠截留分布图(有关研究将另文报道),为我国主要森林生态系统林冠截留变化的模拟与预测提供了新的方法、为我国公益林的持续经营与开发利用提供理论基础。

应用地统计学方法,利用 47 个我国主要森林生态系统林冠截留量的测量值及其相应的经、纬度值,以 0.1 为步长,在我国森林分布区范围内进行森林生态系统林冠截留的地统计学模拟。模拟结果表明,我国主要森林生态系统林冠截留量是随着经度的增大而增大,随着纬度的增大而减小,呈现由东南沿海向西北内陆、由南向北逐步递减的大趋势。这与我国年降雨量在空间上的分布的规律性是一致的,即我国降水来源主要来自夏天东南季风,降水分配上虽存在着地区间的不均匀性,时间上的不平衡性和年度之间的不稳定性,但其总的趋势是由东南沿海的 $2\ 000\ \text{mm}$ 左右向西北内陆逐渐减少到 $200 \sim 100\ \text{mm}$ 或 $50\ \text{mm}$ 以下;南部湿润区的 $1\ 000 \sim 2\ 000\ \text{mm}$ 向北部半干旱区逐渐减少到 $250 \sim 350\ \text{mm}$ 。

4 讨论

从地理因素的角度研究森林截留规律,不仅可以为全国森林生态系统水文生态功能分布图绘制提

供基础资料,而且可以为科学经营管理水源林、合理开发利用水资源、充分发挥森林水文生态功能提供理论依据。由于我国主要森林生态系统类型林冠截留量的变动系数为 70.29% ,而截留率的变动系数为 $36.16\%^{[1]}$,说明不同森林类型的林冠截留量存在较大的波动而截留率波动相对较小。因此,本文在前人测定的主要森林生态系统林冠截留量的基础上,以我国 47 个主要森林生态系统林冠截留量为研究对象,应用地统计学方法研究模拟了我国主要森林生态系统林冠截留量的地理变化规律,回归优度达 88.15% ,比前人用三因素多元地理空间模型分析的回归优度提高了 31.73 个百分点^[1]。说明地统计学方法能客观反映我国主要森林生态系统林冠截留的地理变化规律、能较好反映我国主要森林生态系统林冠截留和地理要素之间的相互关系,为驱动我国主要森林生态系统林冠截留变化的环境因子的综合模型研究提供了有益借鉴、为研究我国主要森林生态系统林冠截留地理变化规律、研究我国主要森林生态系统林冠截留预测、模拟与控制提供了新方法和新手段。根据所计算得到的权重系数及变异函数,可以应用该方法实现未知点的主要森林生态系统林冠截留空间内插,从而绘制我国主要森林生态系统林冠截留分布图,全面展现我国主要森林生态系统林冠截留的分布规律,为我国森林生态系统持续经营、利用与保护提供理论基础。

本文在研究我国主要森林生态系统林冠截留的地理变化规律时,是把经度和纬度作为一个二维空间坐标,但由于影响主要森林生态系统林冠截留变化的因素包括气候、土壤、森林生态系统林分因素等多项因子,尤其以降水量和林分结构的影响最大。在收集得到影响我国主要森林生态系统截留的各项因素有关资料后,可以采用主成分分析方法把所有这些材料和数据浓缩为一个二维或三维空间坐标,利用降维后的信息研究分析我国主要森林生态系统林冠截留的地理变化规律;还可以研究模拟分析主要森林生态系统林冠截留的微观地理变化规律,如热带、亚热带主要森林生态系统林冠截留的地理变化规律、寒温带、温带主要森林生态系统林冠截留的地理变化规律,从而推动我国森林生态系统水文要素地理变化的宏观研究和微观研究的发展。由于林冠截留量不同的林分之间的关系不仅与林分结构有关,而且与林分所处的地理环境有关,因此这种复杂关系有待于进一步深入研究。

降雨季节、降水的强度、频率、分配及天气状况和林分特征等因素对森林林冠截留量会产生显著影响, 它们是影响森林生态系统林冠截留的重要因素。因此, 在全面收集降水及林分特征与森林生态系统林冠截留等有关信息的基础上, 可以分析降水及林分特征有关因素与林冠截留的数量关系以筛选对林冠截留存在显著影响的因素, 再应用地统计学方法建立显著因素与林冠截留之间的规律模型。当然, 森林截留模型目前已进入动态过程的模拟阶段, 因此, 我们可以在系统观察、收集森林林冠截留过程与降水过程及林分特征之间的状态变化资料的前提下, 建立林冠截留过程与降水过程等生态因子之间的动态关系, 从而实现林冠截留的动态模拟。我国主要森林生态系统林冠截留分布图绘制将另文报道。

参考文献 (References)

- [1] Wen Yuanguang, Liu Shirong. Quantitative analysis of the characteristics of rainfall interception of main forest ecosystems in China [J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 1995, 31(4): 289~ 298 [温远光, 刘世荣. 我国主要森林生态系统类型降水截留规律的数量分析 [J]. 林业科学, 1995 31(4): 289~ 298]
- [2] Wang Bing, Liu Shirong. The simulation study for geographical distribution law of some forest hydrologic Factors of China [J]. *Acta Ecologia Sinica*, 1997, 17(4): 344~ 349 [王兵, 刘世荣. 中国若干森林水文要素地理分布规律的模拟 [J]. 生态学报, 1997, 17(4): 344~ 349]
- [3] Journel A G, Huijbregts M. Mining Geostatistics [M]. London: Academic Press, 1978 89~ 247
- [4] Matheron. Principles of geostatistics [J]. *Economic Geology*, 1963, (58): 1246~ 1266
- [5] Clark I. Practical Geostatistics [M]. London: Applied Science Publishers, 1979: 145~ 241
- [6] Wang Renduo, Hu Guangdao. Linear Geostatistics [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1988: 89~ 112 [王仁铎, 胡光道. 线性地统计学 [M]. 北京: 地质出版社, 1988: 89~ 112]
- [7] Wu Chengzhen, Hong Wei. Study on Spatial Variability of Chinese FR Sterile Seeds [J]. *Chinese Journal of Applied & Environmental Biology*, 1998, 4(1): 15~ 19 [吴承祯, 洪伟. 杉木种子涩籽空间变异性 [J]. 应用与环境生物学报, 1998, 4(1): 15~ 19]
- [8] Hong Wei, Wu Chengzhen. Application of Kriging method for study of geographic distribution law of rainfall erosivity in China [J]. *Journal of Soil Erosion and Soil and Water Conservation*, 1997, 3(1): 91~ 96 [洪伟, 吴承祯. Kriging 方法在我国降雨侵蚀力地理分布规律研究中的应用 [J]. 土壤侵蚀与水土保持学报, 1997, 3(1): 91~ 96]
- [9] Hong Wei, Wu Chengzhen. Geographic variation of DBH growth of Chinese FR provenances [J]. *Journal of Plant Ecology*, 1998, 22(2): 186~ 192 [洪伟, 吴承祯. 杉木种源胸径生长地理变异规律的研究 [J]. 植物生态学报, 1998, 22(2): 186~ 192]
- [10] Pan Weichou. Editor. Proceedings of National Forestry Hydrology Seminar [C]. Beijing: Surveying and Mapping Press, 1989: 5~ 146 [潘维涛主编. 全国森林水文学术讨论会文集 [C]. 北京: 测绘出版社, 1989: 5~ 146]
- [11] Liu Shirong, Wen Yuanguang. ed. Eco-hydrological Functions of Forest Ecosystems in China [M]. Beijing: China Forestry Publishing House, 1996: 149~ 159 [刘世荣, 温远光, 王兵, 等. 中国森林生态系统水文生态功能规律 [M]. 北京: 中国林业出版社, 1996: 149~ 159]
- [12] Wang Xueren. Multivariate Statistics Analysis of Geology Data [M]. Beijing: Science & Technology Press, 1980: 48~ 67 [王学仁. 地质数据的多变量统计分析 [M]. 北京: 科学技术出版社, 1980: 48~ 67]
- [13] Wang Zhengquan. Geostatistics and Its Application to Ecology [M]. Beijing: Science Press, 1999: 69~ 74 [王政权. 地统计学及在生态学中的应用 [M]. 北京: 科学出版社, 1999: 69~ 74]
- [14] Webster R. Quantitative spatial analysis of soil in the field [J]. *Advance in Soil Science*, 1985, (3): 1~ 70
- [15] Isaaks E H, Srivastava R M. An Introduction to Applied Geostatistics [M]. New York: Oxford University Press, 1989: 19~ 57

Quantitative Evaluation of the Geographic Variation of Rainfall Interception of Forest by Geostatistics Method

HONG Tao^{1,2}, WU Chengzhen^{1,2}, FAN Hailan¹, SONG Ping¹

(1 Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002, China;

2 Fujian Forest Ecological System Process and Management Key Laboratory, Fuzhou 350002, China)

Abstract Based on the previous data from published papers concerning a variety of forests distributing in different graphical regions in China, the law of geographic variation of canopy rainfall interception of main forest ecosystems in China was studied by using geostatistics method in this paper. The results showed that there was an obvious law of geographic variation between canopy rainfall interception and longitude and latitude of environmental factors, that the regressing dominant degree of geostatistics method was 88.15%, which was superior to the three-variable geographic space model (its regressing dominant degree was 56.24%). The geostatistics method could better reflect the law of geographic variation of canopy rainfall interception of main forest ecosystems in China and could be a powerful tool for modeling and predicting the spatial distribution of canopy rainfall interception of main forest ecosystems in China. The main forest ecosystems in China included cold temperate and temperate mountains deciduous and conifer forest or evergreen conifer forest, subtropic and tropic eastern or western mountains evergreen conifer forest, subtropic mountains evergreen broadleaf forest or deciduous and broadleaf mixed forest, subtropic bamboo forest, etc.

Key words rainfall interception; forest ecosystem; geographic variation; geostatistics method

封面照片说明: 西藏阿里荒漠山地景观

青藏高原是世界屋脊, 西藏阿里处于世界屋脊的巅峰区域, 是屋脊上的屋脊。

阿里地区位于西藏最西端, 境内喜马拉雅山脉、冈底斯山脉、唐古拉山脉、念青唐古拉山脉、喀喇昆仑山脉、昆仑山脉等世界上最高大、最雄伟的山脉横亘在广阔的土地上, 平均海拔在 4 500 m 以上; 众多的雪山冰川孕育了马泉河、狮泉河、象泉河和孔雀河等, 它们是雅鲁藏布江、印度河、萨特累季河、恒河支流哥格拉河的上游源头。因此, 阿里被称为“千山之巅、万水之源”。阿里属高寒荒漠山地, 气候寒冷干燥, 降水量少, 年均降水量 50~100 mm; 地表多呈戈壁和石质山地, 山麓地带带有沙丘堆积; 植物种类十分稀少, 以高寒草原为主, 生长有耐干旱和高寒的垫状小灌木等; 动物种类贫乏, 主要野生动物有适应高寒气候及粗糙草场的藏羚羊、野牦牛、野驴、岩羊和藏盘羊等。

(山水)