

利用中国气候信息系统研究年降水量空间分布规律

尚宗波¹, 高 琼², 杨奠安¹

(1. 中国科学院植物研究所植被数量生态学开放研究实验室, 北京 100093; 2. 北京师范大学资源科学研究所, 北京 100875)

摘要:利用中国气候信息系统,做出了中国年平均降水量分布图,以描述中国水分状况。首先利用大比例尺地形图和数字化后的地形资料,建立中国数字高程模型;根据全国气候资料建立趋势面分析模型,模拟出全国降水量空间分布的趋势值,利用空间插值方法对趋势面分析产生的剩余值进行空间插值,估算出降水量的空间分布资料,并对其进行 2 次平滑处理后建立中国降水量空间分布数据库;利用生态信息系统完成了图形输出和编辑处理,最后输出中国多年平均年降水量分布图。该方法具有快速、准确、理论性强、结果可靠、实用性强等特点,既可以作为生态学模型的资料,又可以生成高精度的气候要素空间分布图。

关键词:降水量;空间分布图;趋势面分析;空间插值;中国气候信息系统;生态信息系统

Spatial pattern analysis of annual precipitation with Climate Information System of China

SHANG Zong-Bo¹, GAO Qiong², YANG Dian-An¹ (1. Laboratory of Quantitative Ecology, Institute of Botany, The Chinese Academy of Sciences, Beijing 100093, China; 2. Institute of Resources Sciences, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

Abstract: With Climate Information System of China, the distribution map of mean annual precipitation was drawn to describe the spatial distribution of China water condition. First, large-scale relief maps and topography data were used to build the Digital Elevation Models of China. Then climatic data were used to build Trend Surface Models, and to simulate the spatial distribution trend of China precipitation pattern. Interpolation method was used to interpolate the surplus calculated by Trend Surface Analysis. The simulated data were “smoothed” twice in order to build the spatial distribution database of China annual precipitation. Ecology Information System was used to plot and edit the graph, to confine the boundary, and to generate the distribution map. Speediness, nicety, reliable theory, credibility, and practicality were characterized by this method, and the simulated results can be verified too. The simulated raster climatic data can be used for ecological modelling, or for high precision distribution map.

Key words: precipitation; spatial distribution map; Trend Surface Analysis; interpolation method; Climate Information System of China; Ecology Information System.

文章编号: 1000-0933(2001)05-0689-06 中图分类号: P426.61+3 文献标识码: A

由于中国气象站点分布密度较低,如何利用有限的资料得到全国的气候要素空间分布,一直是气象学、生态研究的难点。国家气象局等^[1,2]已经成功地完成了 1951~1980 年 30a 平均气温、年总降水量、年

基金项目: 国家自然科学基金重大基金(No. 39899370), 国家自然科学基金(No. 39770133), 国家自然科学基金杰出青年基金(No. 39725006)和中国科学院资源与生态环境重大研究(B;KZ951-B1-108)资助项目

收稿日期: 1999-10-14, 修订日期: 2000-07-26

作者简介: 尚宗波(1973~), 男, 山东省邹平县人, 博士。主要从事全球变化、生态学、生物地球化学循环模型等研究。

总日照时数、年总辐射、年平均风速、年平均积温等气候要素的空间分布图,采用的方法,通常根据全国气象站点多年连续观测资料,人工描绘出各个气候要素空间分布的等值线图。这种方法的优点是精确、细致,但是经验性较强,工作繁琐,并未得到每一个小的栅格点的气候要素值。本文提出一种制作气候要素空间分布图的方法,并利用 Visual C++ 5.0 成功的开发出中国气候信息系统(Climate Information System of China, CISC)^[3]软件包和气候信息库,弥补了空间分析研究中对栅格资料的需求。

中国年平均降水量的分布作为重要的气候指标和生态指标,可以近似反映中国水分供给状况空间分布规律^[4]。本文根据中国 954 个气象站点 1951~1980 年 30a 平均降水量观测资料,利用中国气候信息系统^[3],制成了中国多年平均降水量空间分布图。

1 方法

中国降水量分布图的制作,主要包括 7 个过程:①气象资料的收集;②中国地形数据库的形成和数字高程模型(DEM)分析;③建立趋势面分析模型;④利用趋势面模型计算气候要素空间分布的趋势值;⑤利用空间插值方法计算剩余值的空间分布;⑥空间数据的平滑处理;⑦图形输出及编辑处理。

1.1 气象资料收集

为了增加气候要素空间分布图和数据库的准确性,需要收集尽可能多的气象站点资料,同时要求资料时间尺度一致,连续观测年度一致。

1.2 中国地形数据库的形成

气候要素的空间分布与空间位置(经度、纬度和海拔高度)关系非常密切,需要首先建立中国地形数据库。方法有 2 个,一是使用数字化后的中国高程资料,这种资料精度和准确率非常高,也可以利用地理信息系统(GIS)、AutoCAD、生态信息系统(EIS)或其它软件,通过扫描仪或数字化仪等根据大比例尺的地形图产生全国地形数据库。利用气候信息系统软件包进行数字高程模型分析。

生态信息系统(EIS)是中国植被数量生态学开放实验室杨莫安教授等研究开发出的集地理信息及生态信息分析于一体的软件。按照三维数据库结构模型建立起来的地理信息库,适宜于不同尺度的多维空间地理信息分析、处理和数据挖掘;多元分析程序软件包、积累式方法库和函数库以及生态描述语言,为与空间分布有关的研究领域提供了动态建模和空间复合分析的平台;图形分析中的多维空间表达则易于复杂空间关系的形象描述。其中,生态信息系统的数据录入模块——EDLS 实现了矢量数据栅格化。具体过程是,首先利用 AutoCAD 软件,通过数字化仪手工跟踪高程等值线,录入地图的地形信息,然后利用生态信息系统的 CADE 模块对其进行坐标变换和投影转换,生成按照地理坐标存储的矢量数据,最后通过 EDLS,使用加权平均或一元回归方法插值产生栅格数据。

1.3 建立趋势面分析模型

趋势面分析方法^[5,6]是一种统计学模型,它利用空间位置坐标^[7]作为自变量,进行空间分布规律分析。趋势面分析并不局限于空间位置坐标,二维趋势面分析方法^[8]还有各向同性趋势面分析、logistic 趋势面分析、Weibull 趋势面分析、周期性趋势面分析,三维趋势面分析中利用时间和空间位置等进行时空分布规律的分析等。下面以空间位置坐标作为自变量,简要介绍三维趋势面分析的数学原理^[7]。

设空间一点 (x_i, y_i, z_i) 上的观测值为 w_i ,以 s 阶多项式函数拟合,即得到以下矩阵:

$$W = GA + \epsilon \tag{1}$$

式中,观测值矩阵 W 与剩余矩阵 ϵ 都为 N 阶向量, N 为观测点数; G 为 $N \times q$ 阶向量;系数矩阵 A 为 q 阶向量; q 与多项式趋势面的阶数 s 有以下关系:

$$q = (s + 1)(s + 2)(s + 3)/6 \tag{2}$$

为了简便,只给出矩阵 G 其中一行向量 D 的表达式,并略去表示观测点号的下标:

$$D = \{1, z, z^2, \dots, z^s, y, yz, yz^2, \dots, yz^{s-1}, \dots, y^{s-1}, y^{s-1}z, y^s, x, xz, xz^2, \dots, xz^{s-1}, xy, xyz, \dots, xyz^{s-2}, \dots, xy^{s-1}, x^2, x^2z, \dots, x^2z^{s-2}, x^2y, x^2yz, \dots, x^2yz^{s-3}, \dots, x^{s-1}y, x^s\} \tag{3}$$

趋势面分析数据计算方法^[7]有 2 种:最小二乘法 and 广义逆算法。最小二乘算法计算中易形成病态方程组,且不易计算阶数较高的趋势面模型,因此三维趋势面模型,可以采用广义逆算法计算得到,方法是利用

Gram-Schmidt 正交化方法计算实矩阵 G 的 Moore-Penrose 型广义逆矩阵 G^+ , 并给出 A 的最短最小二乘解 $\bar{A}$:

$$\bar{A} = G^+ W \tag{4}$$

得到了系数矩阵的最短最小二乘解 $\bar{A}$ 后, 即可以计算趋势值和剩余值。

1.4 气候要素空间分布趋势值的计算方法

利用数字高程模型分别求出各栅格点的经度、纬度和海拔高度作为自变量, 利用气象观测台站的降水量观测值作为因变量, 得到大尺度影响下的气候要素空间分布规律, 然后计算出趋势值和剩余值。趋势值为:

$$\hat{Y}_{i,j} = D_{i,j} \bar{A} \tag{5}$$

式中, $\hat{Y}_{i,j}$ 为气候因子模拟结果, $\bar{A}$ 为系数矩阵。

趋势面分析的剩余值可以看作局地因子和随机要素的共同作用, 它不能用大尺度地形因子分析结果解释, 利用空间插值方法, 将剩余值插值到各个栅格上。空间插值方法有很多种, 本文采用以下方法: 利用气候信息系统, 寻找栅格点周围临近的 6 个气象站点, 并保证在东、西、南、北 4 个方向上至少有一个站点, 利用以下公式计算插值结果:

$$V_p = \sum_{i=1}^t (V_i/d_i) / \sum_{i=1}^t (1/d_i) \tag{6}$$

式中, V_p 为剩余值插值结果, d_i 为距离相邻气象站点的距离, V_i 为相邻气象站点趋势面分析产生的剩余值, t 为相邻气象站点的个数。

通过趋势面模型模拟和剩余值插值方法可以最后计算出气候因子栅格资料并进行空间分布规律的分析。

1.5 空间数据的平滑处理

模型计算得到的降水量空间分布资料较为“粗糙”, 必须经过“平滑”处理后方可真实表现气候要素空间分布规律, 采用以下公式进行平滑处理:

$$Y_s = \sum_{i=1}^8 (Y_i/d_i) / \sum_{i=1}^8 (1/d_i) \tag{7}$$

式中, Y_s 为栅格数据平滑处理结果, Y_i 为围绕该栅格的 8 个栅格点, d_i 为该栅格点距离周围栅格点的距离。这种方法尽可能少的损失原有信息, 同时消除了奇异点, 实现了平滑空间数据的功能。为了避免数据的“失真”, 仅对降水量空间分布数据平滑处理了 2 次。

1.6 图形输出及编辑处理

EIS 可以按照地理坐标处理图形、图像信息, 支持 9 种地图投影, 完成颜色或纹理显示的平面图或 3 种三维图, 绘制经纬网、等值线、多边形、多种图例和地图修饰, 实现各属性区域的面积计算、边界长度和距离测量等多种功能, 可以将图形文件保存为 PCX 或 TIF 两种格式。本文利用 EIS 完成了中国降水量分布图的图形输出和编辑处理

2 资料来源与处理

研究中使用了如下资料: ① 中国 954 个气象观测台(站)1951 年到 1980 年 30a 各月降水量资料; ② 1:500 000 中国地形图; ③ 数字化后的中国高程资料, 分辨率为每 1 经度 $\times$ 1 纬度覆盖 32×48 个栅格点。

在 Visual C++ 5.0 环境下编写了中国气候信息系统来分别计算气候资料月均值和年均值, 进行数字高程模型分析, 建立趋势面分析模型, 计算气候要素空间分布的趋势值, 空间插值计算, 栅格数据形成和平滑处理。利用生态信息系统进行了生态因子空间分布的图形分析和边界处理。

3 结果分析

利用中国气候信息系统及中国高程数据库和 1:500 000 中国地形图, 建立了中国数字高程模型, 得到了每个栅格点经度、纬度和海拔高度。趋势面分析模型适用于区域尺度的生态因子空间分布规律分析, 本文将中国分为 8 个区域: 东北区、华北区、华中区、华南区、内蒙区、西北区、青藏区和西南区。为了避免区域交界处的数据“跳跃”现象, 各个区域与相邻区域之间都存在一定的重叠。本文建立了中国降水量 12 个月

平均及年平均 2 种时间尺度的 3 阶趋势面分析模型,并对趋势面模型模拟结果进行了验证,结果见表 1 和图 1、图 2。以中国 35 个重要城市或地区为代表,表 2 给出了年平均降水量趋势面分析模拟结果和剩余值,以说明趋势面模型模拟效果。

利用趋势面分析模型和栅格点的经度、纬度、海拔高度,计算得到各个栅格点降水量的趋势值;利用空间插值方法,将趋势面分析产生的剩余值插值到每个栅格点中,得到栅格点降水量的预测值,分别

表 1 2 种时间尺度的趋势面分析模型模拟结果
Table 1 Simulation results of Trend Surface Model under two temporal scale

时间尺度	总样本数	总模型数	R^2
Temporal scale	Total samples	Total models	
月平均降水量 ^①	25236	12×8	0.8765
年平均降水量 ^②	2103	8	0.8997

① Mean monthly precipitation; ② Mean annual precipitation。

表 2 年平均降水量趋势面分析结果举例说明
Table 2 Illustration of Trend Surface Analysis results on mean annual precipitation of China

气象站点 Meteorological observation station	经度(°) Longitude	纬度(°) Latitude	海拔高度(m) Elevation	实测值(mm) Observed data	趋势面模型 模拟值(mm) Simulated results of TSA	剩余值(mm) Surplus
沈阳 Shenyang	123.26	41.46	41.6	734.4	680.76	53.64
大连 Dalian	121.38	38.54	92.8	658.7	789.72	-131.02
吉林 Jilin	126.28	43.57	183.4	674.2	692.77	-18.57
长春 Changchun	125.13	43.54	236.8	593.9	662.58	-68.68
哈尔滨 Harbin	126.37	45.41	171.7	523.3	587.55	-64.25
济南 Jinan	116.59	36.41	51.6	685.2	638.41	46.79
青岛 Qingdao	120.20	36.04	76.0	775.7	798.20	-22.50
西安 Xi'an	108.56	34.18	396.9	580.2	557.34	22.86
北京 Beijing	116.28	39.48	31.5	644.3	631.82	12.48
天津 Tianjin	117.10	39.06	3.3	569.8	603.53	-33.73
石家庄 Shijiazhuang	114.25	38.02	80.5	550.1	583.71	-33.61
太原 Taiyuan	112.33	37.47	777.9	459.4	511.79	-52.39
郑州 Zhengzhou	113.39	34.43	110.4	641.0	661.04	-20.04
重庆 Chongqing	106.29	29.31	351.1	1150.8	1236.42	-85.62
贵阳 Guiyang	106.43	26.35	1071.2	1174.7	1299.4	-124.70
昆明 Kunming	102.41	25.01	1891.4	1006.4	887.04	119.36
上海 Shanghai	121.26	31.10	4.5	1123.7	1213.38	-89.68
南京 Nanjing	118.48	32.00	8.9	1031.3	1023.66	7.64
杭州 Hangzhou	120.10	30.14	41.7	1398.7	1325.98	72.72
合肥 Hefei	117.14	31.52	29.8	988.6	1068.19	-79.59
福州 Fuzhou	119.17	26.05	84.0	1343.6	1793.79	-450.19
台北 Taibei	121.31	25.02	9.0	1869.9	2017.98	-148.08
武汉 Wuhan	114.04	30.38	23.3	1204.6	1190.58	14.02
长沙 Changsha	113.05	28.12	44.9	1396.0	1447.74	-51.74
桂林 Guilin	110.18	25.20	161.8	1900.3	1453.96	446.34
广州 Guangzhou	113.19	23.08	6.6	1694.1	1725.72	-31.62
海口 Haikou	110.21	20.02	14.1	1684.6	1563.84	120.76
西沙 Xisha	112.20	16.50	4.7	1506.3	1221.53	284.77
东沙 Dongsha	116.43	20.40	0.0	968.1	1390.15	-422.05
银川 Yinchuan	106.13	38.29	1111.5	202.7	212.92	-10.22
呼和浩特 Huhot	111.41	40.49	1063.0	417.4	299.71	117.69
兰州 Lanzhou	103.53	36.03	1517.2	327.8	389.78	-61.98
西宁 Xi'ning	101.46	36.37	2261.2	368.1	304.90	63.20
乌鲁木齐 Wulumuqi	87.37	43.47	917.9	277.6	184.29	93.31

计算了中国 1951~1980 年 12 个月平均和年平均降水量资料。利用平滑处理方法,对空间分布资料进行了

2 次平滑处理,建立了中国降水量空间分布数据库,分辨率为每 3 经度 $\times$ 2 纬度覆盖 96 $\times$ 96 个栅格点。利用 EIS 进行了图形输出、图形编辑和处理、边界处理,完成了中国平均降水量空间分布图(如图 3 所示)。

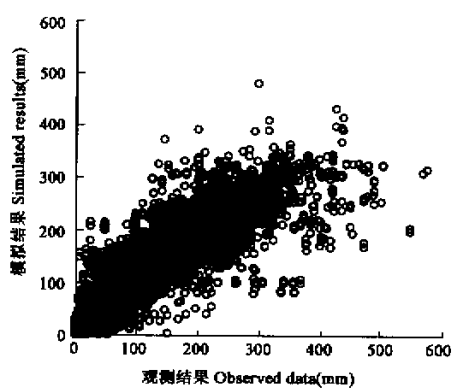


图 1 月平均降水量趋势面模拟结果与实测结果比较
Fig. 1 Comparison between observed data and simulated results of mean monthly precipitation

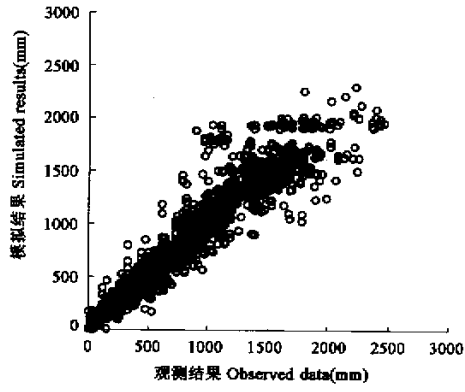


图 2 年平均降水量趋势面模拟结果与实测结果比较
Fig. 2 Comparison between observed data and simulated results of mean annual precipitation

4 讨论

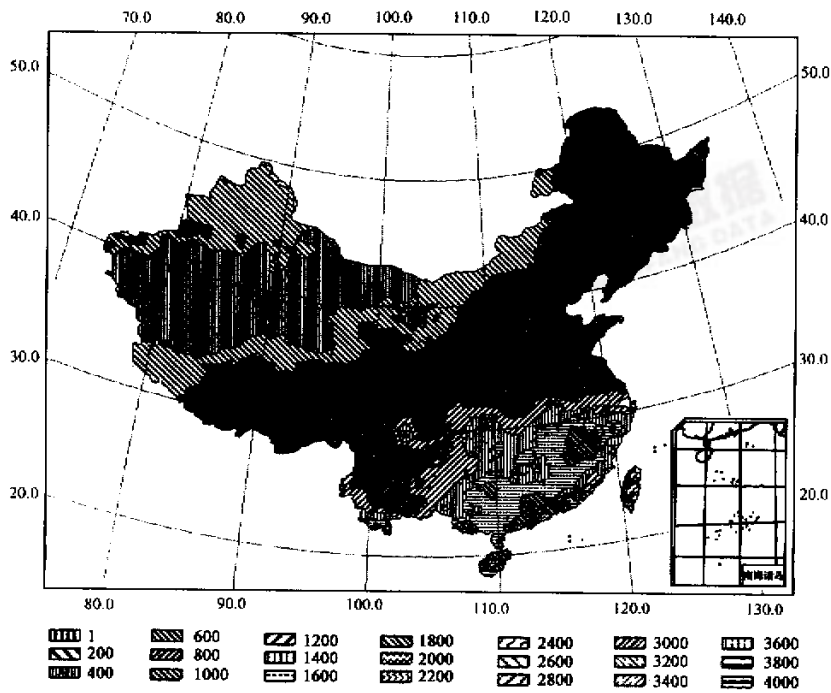


Fig. 3 Spatial distribution map of annual mean precipitation in China

利用中国气候信息系统软件及生态信息系统快速生成中国降水量分布图,该方法具有以下特点:

- (1) 快速 使用数字化后的中国地形资料,可以在 1 日之内完成从气象资料输入到图形打印输出的全部过程。
- (2) 准确 该方法完全由计算机操作完成,不会带来任何人为误差。
- (3) 理论性强 利用趋势面分析方法确定气候要素的空间趋势分布规律,空间插值方法模拟局地环境的影响作用,可以揭示气候要素的空间分布规律。
- (4) 结果可靠 趋势面分析给出了模型模拟的准确程度,作为模型结果可信度的一种指标,并且保持了原有气象站点的全部信息。
- (5) 实用性强 输出结果为栅格资料,既可以经空间尺度转换后提供各种精度的生态学模型使用,又可以精确绘制气候要素分布图。
- (6) 适应多种尺度要求 利用不同分辨率的地形资料,可以产生对应相同分辨率的气候要素空间数据库,以满足不同尺度景观生态学模型的需要。

考虑该方法使用中可能遇到的特殊情况,提出了如下改进措施:

- (1) 模型结果受气象站点资料的限制;由于中国边界处和青藏、西北等地区气象站点较少,可能会增加预测结果的误差,产生歧变现象。改进方法是尽可能多的收集气象站点的气候资料,增加气象站点的分布密度。
- (2) 全部过程由计算机完成,无法利用人的经验对某些特异情况进行处理。改进方法是将模型输出结果存为文本文件格式,对特殊区域根据实测资料进行人为校正,然后存为二进制文件。自然,平滑处理也可以消除大部分歧变点。

参考文献

- [1] 中国自然地理图集(第二版). 北京:中国地图出版社,1998. 252.
- [2] 中华人民共和国地图集(第二版). 北京:中国地图出版社,1996. 78.
- [3] Shang Zhong Bo, Gao Qiong, Yang Dian An. Climate Information System of China. *Climate Research*, 2001 **18**(1).
- [4] Shang Zhong Bo, Gao Qiong, Yang Dian An. Digital Ecological Model and case study on China water condition. *Ecological Modelling*, 2001, **139**(2~3): 235~252.
- [5] Chorley R J, Haggett P. Trend-surface mapping in geographical research. In: Berry B J L, Marble D F. eds. *Spatial Analysis: A Reader in Statistical Geography*. Prentice-Hall Inc., Englewood Cliffs, N. J. 1968. 195~217.
- [6] Gittins R. Trend-surface analysis of ecological data. *J. Ecology*, 1968, **56**: 845~869.
- [7] 潘恩沛, 周杨杞, 等. DJS-21 机多元统计程序集. 北京:原子能出版社, 1984.
- [8] 周国法, 徐汝梅. 生物地理统计学——生物种群时空分析的方法及其应用. 北京:科学出版社, 1998. 115~119.