

基于 GIS 的大别山区东段雨季降水空间分布模拟

张宏群, 马晓群, 范伟, 杨元建

(安徽省气象科学研究所, 安徽 合肥 230031; 安徽省大气科学与卫星遥感重点实验室, 安徽 合肥 230031)

摘要: 区域降水量是重要的环境变量, 区域降水量的研究对区域水资源合理规划与利用具有重要科学价值。依据大别山区东段及附近 14 个气象台站和 8 个气候考察站 34 a 雨季降水和风向等气象资料, 以及各站点的经纬度、坡向、海拔高度等地理信息, 并引进“主风向效应指数”, 建立大别山区东段雨季降水分布模拟模型。利用 GIS 技术进行栅格数据的空间分析, 模拟大别山区东段降水空间分布。模拟结果表明, (1) 针对不同区域特点, 适当增加有效的地形和气象因子参与插值, 可以提高山区降水模拟精度, 大别山区东段雨季的逐月、夏季和雨季降水空间分布模拟相对误差均小于 10%; (2) 大别山区东段南北坡雨量分布具有明显的时空变化, 边界层山地的扰动作用对降水量分布影响明显, 雨量的南北坡的季节变化与大气环流的季节变化一致。

关键词: GIS; 大别山区东段; 降雨量; 插值

文献标识码: B

文章编号: 1000-288X(2010)05-0152-06

中图分类号: S161.6⁺3

Simulation of Spatial Precipitation Distribution in East of Dabie Mountains Based on GIS

ZHANG Hong-qun, MA Xiao-qun, FAN Wei, YANG Yuan-jian

(1. *Anhui Meteorological Research Institute, Hefei, Anhui 230031, China;*

2. Key Laboratory of Atmospheric Sciences and Satellite Remote Sensing of Anhui Province, Hefei, Anhui 230031, China)

Abstract: Regional precipitation is an important environmental factor and has a great scientific value in the reasonable programming of regional water resources. In this paper, meteorological data of rainfall, wind direction, etc. from 1971 to 2004 were picked up in 14 observatory stations and 8 climate investigation stations. Geography information such as longitude, latitude of the station, sloping direction, and altitude were also included. Prevailing wind-direction effect index and altitude were introduced to reflect climate difference and terrain for precipitation interpolation. Precipitation simulation model in rainy season in the east of Dabie Mountains was built. Spatial precipitation distribution in the east of Dabie Mountains was simulated by using spatial analysis function of GIS for grid data. Simulated results show that in view of different regional characteristics, precipitation simulation precision can be improved by the addition of effective terrain and meteorological factors to participation in interpolation. The relative errors of spatial precipitation distribution simulation in each month and summer and rainy seasons in the east of Dabie Mountains are less than 10%. Precipitation on south and north slopes in the east of Dabie Mountains is characterized by obvious spatiotemporal variation. Mountainous disturbance as a boundary layer has obvious influence on precipitation. Seasonal variation of precipitation on south and north slopes is consistent with seasonal variation of atmospheric circulation.

Keywords: GIS; the east of Dabie Mountains; precipitation; interpolation

降水是基础的自然环境因子, 是反映气候变化影响的重要指标, 降水引起的暴雨和暴雨形成的径流直接作用于土壤表面, 是土壤侵蚀的直接动力^[1]。降水

尤其是山区降水的空间特征研究对防灾减灾和开发利用水资源具有重要意义, 但是由于山地降水的复杂性, 其空间分布的研究又具有一定难度。近些年来,

国外学者对山地降水的空间分布进行了大量研究, 一些研究^[2-4]将海拔高度考虑到地理统计中, 利用回归方程, 建立降水与地形变量值如纬度、经度、大陆度、坡度坡向的回归方程。B. Sevruk 等^[5]在小流域降水分布研究中还考虑了风和地形的影响; Marquinez 等^[6]考虑用许多地形变量如坡向坡度等作为多元回归因子, 求得降水空间的回归方程, 计算 30 a 的月平均的标准误差为 10%, 为提高回归方程计算的精度, Marquinez 将研究区域的降水分为干季和湿季分别建立回归方程。国内学者对山地降水空间分布的研究也很活跃, 孙鹏森等^[7]在 ANUSPLIN 和 GIS 空间分析技术的支持下, 引进体现季风方向和坡向之间耦合效应的主风向效应指数 (PWEI) 和海拔高度等变量, 采用样条平滑技术对岷江流域月平均降水量进行模拟, 结果表明, 雨季 (5—9 月) 的预测误差远小于旱季, 说明东南季风对迎风坡面有明显的致雨效应, 并因 PWEI 的运用提高了模拟精度; 周长艳等^[8]利用九寨沟、黄龙地区附近代表站的降水资料及 NCEP/NCAR1959—2002 年共 44 a 月平均再分析资料, 采用小波分析、合成分析等方法对该地区降水以及水汽输送特征进行了研究, 结果表明, 九寨沟、黄龙地区的降水主要集中在 5—9 月, 干湿季明显, 7 月份降水最多; 蔡福等^[9]以东北地区 44 a 共 172 个观测站的四季降水资料为数据源, 采用 IDW、ANUSPLIN 模型等多种空间插值方法, 对东北地区冬、夏、年降水数据进行空间插值精度比较, 认为 ANUSPLIN 模型对降水数据空间插值的相对误差最小。ANUSPLIN 模型在多变量如经度、纬度和海拔高度等统计分析基础上引入样条平滑机制, 并通过人机交互使归一化交叉检验值 (GCV) 达最低, 从而达到理想的模拟精度。

本文以大别山区东段为研究对象, 针对不同区域特点, 适当增加有效的地形因子和气象因子并结合 GIS 的空间分析功能, 是提高山区雨季降水模拟精度的新途径。大别山区东段属北亚热带温暖湿润季风气候区, 具有典型的山地气候特征, 气候温和, 雨量充沛, 年均降水量达 1 832 mm, 比附近地区多达 360 mm。该区域地形复杂, 降水空间分布、时间分布的变化较大, 是暴雨频繁发生的地区, 降水与地理空间有一定的关系, 是研究水资源、洪涝和地质灾害的理想区域。大别山区东段雨季降水的空间分布模拟对提高该山区旱涝预报水平、防灾减灾以及开发利用山区农业气候资源及水资源综合利用都有重要意义。大别山区东段的几大水库也是合肥、六安等城市的饮用水源地, 因而对大别山区东段降水的分布模拟具有重要的区域社会安全价值。本文借鉴主风向效应指

数 (PWEI) 思路, 并增加有效的地形因子和气象因子及其耦合效应指数, 考虑大别山区东段最大降水高度, 加入海拔较高的气候考察站的数据, 采用简单易行的统计回归模型的方法对大别山区东段雨季降水进行模拟, 较好地提高了山区降水模拟的精度。

1 研究区概况、资料和研究方法

1.1 研究区概况

研究区位于 $115^{\circ}21.96'E$ — $117^{\circ}29.84'E$; $29^{\circ}58.48'N$ — $32^{\circ}6.88'N$ 的范围, 包括安徽省境内的大别山区以及向东缓冲 30 km 的区域 (图 1)。为东北—西南走向, 是长江与淮河水系的分水岭, 海拔通常在 500~800 m 之间, 主峰部分海拔 1 500 m 左右。



图 1 大别山区东段及气象台站和气候考察站分布

1.2 研究资料

研究所需气象资料分为 3 部分: (1) 基础气象资料, 为研究区内 11 个常规气象台站 1971—2004 年共 34 a 逐日降水资料以及风向资料; (2) 安徽省 80 年代大别山区 8 个气候考察站 1983 年 4 月 1 日—1986 年 3 月 31 日 3 a 完整的降水和风向资料, 这 8 个气候考察站中百家山、大化坪、青枫岭和四望山 4 个站位于大别山的北坡, 天柱山林场、马祖庵、蛇形塘和赵公岭 4 个站位于大别山的南坡, 海拔在 300, 500, 800 和 1 000 m 左右, 很好地弥补了常规气象台站海拔偏低的不足; (3) 与研究区交界的外省邻近的商城、麻城和英山 3 个气象台站的数据。

地理信息资料为研究区 1:5 万数字高程模型 (DEM), 以及由 DEM 在 ArcGIS 中生成的坡向、坡度数据等。

1.3 研究方法

(1) 资料处理。对 8 个气候考察站的逐日资料进行“插值延补”, 使其和常规气象台站具有相同时间尺度的即 34 a (1971—2004 年, 下同) 逐日降水和风

向资料,具体方法是综合考虑气候考察站和其附近常规气象台站的地形、坡向和距离等因素,确定最合适的常规气象台站作为参考站,然后把 3 a 逐日的气候考察站与这个最合适的常规气象台站的相同时间段的资料进行相关分析,建立回归模型,并进行 F 检验,再根据通过检验的回归模型和相应常规气象台站 34 a 的逐日资料把气候考察站的资料“延长”至 1971—2004 年。

(2)“主风向效应指数(PWEI, prevailing wind-direction effect index)”。坡向与季风方向之间的角度是影响山区降水的关键因素,称之为“主风向效应”,为了能够定量化描述主风向效应,构建“主风向效应指数”作为变量之一参与降水的插值^[7]。PWEI 主要通过坡向和当地的主风向 2 个因子建立。

$$PWEI = \cos[\pi(\alpha - \beta + 360)/180] + 1 \quad (0^\circ \leq \alpha < \beta)$$

$$= \cos[\pi(\alpha - \beta)/180] + 1 \quad (\beta \leq \alpha < 360^\circ) \quad (1)$$

式中: α ——某点的坡向; β ——主风向。PWEI 的取值区间为 0~2, 0~1 之间为背风坡, 1~2 之间为迎风坡,当坡向为 β 时, PWEI 达到最大值 2.0, PWEI 综合了主风向和坡向的耦合效应。运用 ARCGIS/GRID 模块在 DEM 的基础上,生成坡向栅格(1 km),然后,在坡向栅格中利用 PWEI 计算公式和地图代数运算法计算产生 PWEI 栅格。由于采用 1 km 的较小栅格单元,在复杂变化的地形条件下, PWEI 值的随机性较大,噪声大,为了能够真实地反映气象站及周边地形的平均状况, PWEI 值取 3×3 卷积降噪处理,即采用气象站周边 9 km^2 范围内的平均 PWEI 值,避免因局部地形变异造成的随机误差。

各研究时段主风向由气象台站 34 a 研究时段 8 个风向所占百分比的平均值做风向玫瑰图得出。

(3)降水量空间分布模型。对山区降水空间分布的研究必须结合数据本身的特点和空间特性选择合适的插值方法,需要将随机插值方法和确定性方法相结合^[10]。有研究表明^[11]统计回归模型在研究范围较小、影响降水分布的地形因子明确时效果较好。海拔高度是影响山区降水的关键因素,每个山体降水与海拔高度都存在特定的关系,本文海拔高度直接从研究区 DEM 中提取。据研究坡度对降水最大增幅作用是在 45° 左右^[12,13]。利用 DEM 数据计算了大别山区东段 $1 \text{ km} \times 1 \text{ km}$ 栅格平均坡度处于 $0^\circ \sim 23^\circ$ 之间,因而在建模时坡度因子不作为主要自变量因子考虑。最终以气象站点的经度、纬度、高程、主风向效应指数为主要自变量因子,降雨量为因变量,建立雨季各月、夏季(6—8月,下同)和雨季(5—9月,下同)的降雨量模型,利用 SPSS 软件对大别山区东段降水空

间分布进行多元回归模拟分析。回归模型为:

$$R = a_1 X + a_2 Y + a_3 H + a_4 PWEI + a_5 \quad (2)$$

式中: R ——降雨量; a_i ($i = 1 \sim 5$)——待估计系数; X ——经度; Y ——纬度; H ——高程;PWEI——主风向效应指数,坡度等非主要自变量因子以及难以确定的其它自变量因子对降雨量的贡献体现在系数 a_5 中^[14]。

由于山区降水随海拔高度的变化呈现为二次函数关系,每个山体都存在某一降水最大高度^[11]。大别山区东段降雨量和海拔高度的经验模式为抛物线型:

$$R = a + b(H - H_m)^2$$

式中: H_m ——最大降水高度。大别山东段不同季节的最大降水高度多年平均值为 1 160 m, 4—6 月平均为 950 m, 7—10 月平均为 1 360 m, 4—10 月平均为 1 090 m^[15]。因此(2)式可改写为:

$$R = a_1 X + a_2 Y + a_3 (H - H_m)^2 + a_4 PWEI + a_5 \quad (3)$$

(4)降水的空间分布模拟。本文利用 ArcGIS 强大的空间分析功能,进行栅格数据的空间分析。在 ArcGIS 中对研究区的经度、纬度、高程和相应的主风向效应指数分别生成 $1 \text{ km} \times 1 \text{ km}$ 的栅格图层,再依据由各月(季)的回归模型得到的经度、纬度、高程和主风向效应指数相应的系数,运用地图代数运算法在 ArcGIS 中叠加生成月(季)的 $1 \text{ km} \times 1 \text{ km}$ 降水栅格数据。

2 结果与分析

2.1 回归模型的建立

大别山区东段 5 月份最大降水高度为 950 m,主风向为 $E(90^\circ)$ 。利用最小二乘法原理进行系数 a_i ($i = 1 \sim 5$)估计,在 SPSS 软件中进行多元回归分析计算得系数分别为: $a_1 = -1.36$; $a_2 = -54.75$; $a_3 = -4.38E-05$; $a_4 = 4.26$; $a_5 = 2 046.94$ 。即 5 月份回归模型为:

$$R = -1.36X - 54.75Y - (4.38E-05) \times (H - 950)^2 + 4.26PWEI + 2 046.94$$

为了判定回归模型所有的自变量对因变量 R (降水量)的影响的显著性,本文采用 F 检验,由 SPSS 计算的 F 值与对于给定置信度 α ($\alpha = 0.05$)所查出的临界值进行比较:

$$F_{\text{降水量}} = 28.09 > F_{0.05}(4, 17) = 2.96$$

由此可以看出,上述模型中各自变量对降水量 (R)的影响是显著的,而且其多元相关系数 R^2 为 0.87,说明上述方程具有一定的可靠性,可以作为大别山区东段 5 月份降水分布的通用模型,用于估计或模拟大别山区东段 5 月份的降水量^[16]。

回归数据的检验。用回归模型计算的各气象站点 5 月份降水量实测值与模拟值及它们之差(残差)见表 1。相对误差为:

$$\left[\frac{\sum | \text{实测值} - \text{模拟值} |}{\sum \text{实测值}} \right] \times 100\% = 195.56 / 3743.09 \times 100\% = 5.22\% < 10\%.$$

可以认为该模型作为大别山区东段 5 月份降水量评估和模拟模型是可靠的。

用建立 5 月份降雨量回归模型同样的方法建立大别山区东段 6—9 月份、夏季和雨季降雨量回归模型见表 2。

以下方程的 $F_{\text{降水量}}$ 均大于 $F_{0.05}(4, 17) = 2.96$, 相对误差(%)均小于 10%, 可以认为以上方程作为相应月份(季)降水量模拟模型是可靠的。周锁铨等^[17]对不同的降水插值方法的精度进行了比较, 相对误差大于 10%, 有些甚至大于 20%。所以, 针对大别山区东段这个研究范围较小, 影响降水分布的主要地形因子明确, 适当增加有效的气象因子, 采用确定的统计回归模型的插值方法对该山区雨季降水分布模拟取得了较好的效果。

2.2 降水的空间分布模拟

由表 2 中 5—9 月份、夏季和雨季的回归模型, 在 ArcGIS 中分别生成 5—9 月份、夏季和雨季的 1 km × 1 km 降水栅格数据。图 2 为 5, 7, 9 月份以及雨季 1 km × 1 km 降水栅格图。

2.3 大别山区东段雨季降水量空间分布的特征分析

大别山区东段 5—9 月各月份与夏季和雨季平均降雨量和极值见表 3。

根据 ArcGIS 中生成的 5—9 月份逐月、夏季和雨季 1 km × 1 km 雨量栅格数据以及图 2 和表 3 对大别山区东段雨季降水空间分布特征进行分析。

表 1 5 月份降水量实测值、模拟值及残差 mm

站号	站名	实测值	模拟值	残差
57399	麻城	154.50	151.94	2.56
58402	英山	174.04	181.04	-6.99
58301	商城	130.22	122.07	8.15
58306	金寨	136.28	125.64	10.64
58311	六安	110.81	118.38	-7.57
58314	霍山	141.42	139.53	1.89
58316	舒城	121.74	135.83	-14.09
58317	岳西	176.50	187.40	-10.90
58319	桐城	159.04	157.27	1.77
58327	庐江	146.65	140.89	5.76
58414	太湖	203.85	190.94	12.92
58415	潜山	191.71	177.62	14.09
58416	怀宁	197.02	189.10	7.92
58417	宿松	184.21	207.89	-23.68
C0001	赵公岭	186.08	193.40	-7.31
C0002	蛇形塘	241.45	211.33	30.12
C0003	天柱山林场	198.37	201.54	-3.17
C0004	马祖庵	211.22	209.25	1.96
C0005	大化坪	152.62	157.30	-4.69
C0006	百家山	165.19	176.42	-11.22
C0007	青枫岭	179.15	182.22	-3.08
C0008	四望山	181.00	186.07	-5.07

表 2 大别山区东段 5—9 月份、夏季和雨季降雨量回归模型

时段	模型	降水量 F	相对误差/ %
5 月	$R = -1.36X - 54.75Y - (4.38E-05)(H-950)^2 + 4.26PWEI + 2046.94$	28.09	5.22
6 月	$R = 1.38X - 66.52Y - (3.96E-05)(H-950)^2 + 8.48PWEI + 2155.69$	14.15	6.35
7 月	$R = -26.26X + 5.52Y - (2.44E-05)(H-1360)^2 + 0.81PWEI + 3126.05$	5.53	6.66
8 月	$R = -0.86X + 15.17Y - (4.35E-05)(H-1360)^2 - 11.12PWEI - 131.31$	6.62	9.79
9 月	$R = -0.53X - 4.40Y - (3.22E-05)(H-1360)^2 + 19.89PWEI + 324.03$	27.64	7.02
夏季	$R = -24.65X - 52.99Y - 0.000125(H-1090)^2 - 12.05PWEI + 5242.56$	8.22	5.43
雨季	$R = -28.16X - 94.96Y - 0.00021(H-1090)^2 - 9.71PWEI + 7287.56$	13.79	4.94

表 3 大别山区东段雨季降水量空间分布的特征值

项目	5 月	6 月	7 月	8 月	9 月	夏季	雨季
平均值	162.50	229.33	209.80	171.96	103.79	612.18	875.99
最小值	99.02	150.83	169.36	124.39	64.62	512.97	719.08
最大值	233.86	306.60	269.27	242.34	164.37	755.91	1114.18

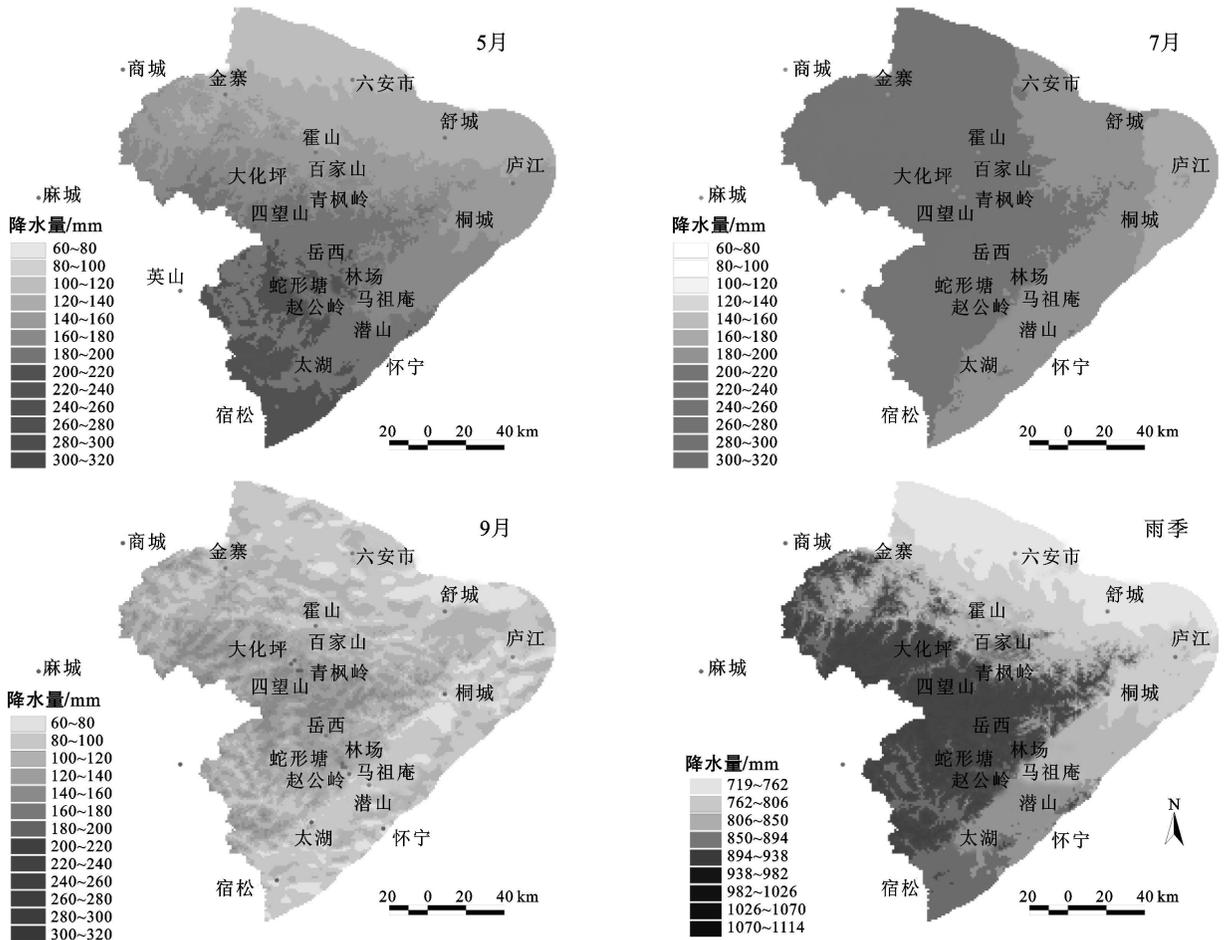


图2 5、7、9月份和雨季1 km×1 km降水栅格图

从5—9月份逐月雨量栅格数据可以看出,大别山区东段雨季逐月降水量存在不同的分布特征。5—6月份平均降雨量南坡多于北坡,相差明显;7月份降雨量大,且北坡平均降雨量略大于南坡;8—9月份情况与5—6月份相反,南坡比北坡小,降雨量较小。从夏季和雨季雨量栅格数据可以看出,雨季和夏季的降水虽量级不同,但分布趋势相近,无论是南坡、北坡,降水量均以山地谷区为最大,离开山地谷区愈远,减少愈多。如南坡的庐江是桐城降水量的85%左右,北坡霍山到六安减少25%左右。

造成以上雨量分布差异的原因,可归结为地形的作用。边界层山地的扰动作用对大别山区东段雨季降水分布影响明显,冯强等^[18]认为大别山地区这个典型的中尺度丘陵高地对局地中尺度天气系统具有“阻滞”作用,局地地形是形成中尺度扰动的一种外强迫,大别山地区这种特殊的中尺度地形,在遇到中尺度低值系统时常使之停滞发展形成暴雨,暴雨系统在喇叭口地形的迎风坡易于发展,影响降水分布。此外根据大别山区东段南北坡雨量差异的环流分析,雨量的南北坡的季节变化与大气环流的季节变化一致。

5—6月正值安徽省春汛及夏汛季节,暖湿气流活跃,西南气流是主要水汽来源,南坡是偏南气流的迎风坡,遇有适当的天气系统影响,由于地形抬升有利暴雨产生,因而雨量南坡多于北坡;7—9月盛夏季节,安徽省较大降水来自台风后期的变性低压及偏东南下的冷空气,由东部海上带来的潮湿气流,首先吹向大别山北坡及东部地区,与适当的影响系统结合,有利于暴雨产生,这种情况下,北坡产生暴雨的机率必然大于南坡,从而出现南北坡雨量明显的季节性变化。

3 结论

(1) 本文基于GIS技术,引进“主风向效应指数”和最大降水高度的经验模式,以确定的因子采用统计回归模型的方法对大别山区东段雨季降水进行了模拟,方法简单易行,由于增加了有效的地形因子和气象因子及其耦合效应指数,同时还考虑最大降水高度,较好地提高了降水模拟的精度,相对误差小于10%。

(2) 大别山区东段南北坡雨季雨量存在明显时空差异,其原因是受边界层山地的扰动作用和大气环

流作用共同影响,雨量的南北坡的季节变化与大气环流的季节变化一致。

(3) 本文虽利用相对高海拔的气候考察站的数据,弥补了常规气象台站海拔偏低的不足,但对整个研究区而言样本数仍偏少,且分布不均匀,如果加入质量控制后的高密度的自动雨量站数据建模,山区降水模拟精度将会进一步提高。近年来安徽省气象部门在山区布设了大量的自动雨量站,弥补了固定台站的不足,但目前已有自动雨量站资料时间尺度尚不够,这项工作有待后续研究。

致谢 安徽省气象台首席预报员郑缓缓正研级高工对本文提出的有益建议和帮助,在此深表敬意和感谢!

[参 考 文 献]

- [1] 万晔,司徒群,李子海.滇西北地理环境特征与区域水土流失相互作用机制研究[J].水土保持通报,2003,23(5):1-5.
- [2] Ninyerola M, Pons X, Roure J M. A methodological approach of climatological modeling of air temperature and precipitation through GIS techniques[J]. Int. J. Climatol., 2000, 20(14):1823-1841.
- [3] Wothing G, Bouvier C H, Danloux J, Fritsch J M. Regionalization of extreme precipitation distribution using the principal components of the topographical environment[J]. J. Hydrol., 2000, 233: 86-101.
- [4] Weisse A K, Bois P. Topographic effects on statistical characteristics of heavy rainfall and mapping in the French Alps[J]. J. Appl. Meteorol., 2001, 40(4): 720-740.
- [5] Sevruck B, Nevenic M. The geography and topography effects on the areal pattern of precipitation in a small prealpine basin[J]. Wat. Sci. Tech., 1998, 37: 163-170.
- [6] Marquinez J, Lastra J, Garcia P. Estimation models for precipitation in mountainous regions: the use of GIS and multivariate analysis[J]. J. Hydrol., 2003, 270: 1-11.
- [7] 孙鹏森,刘世荣,李崇巍.基于地形和主风向效应模拟山区降水空间分布[J].生态学报,2004,24(9):1910-1915.
- [8] 周长艳,李跃清,彭俊.九寨沟、黄龙风景区的降水特征及其变化[J].资源科学,2006,28(1):113-119.
- [9] 蔡福,于慧波,矫玲玲,等.降水要素空间插值精度的比较:以东北地区为例[J].资源科学,2006,28(6):73-79.
- [10] 张红平,周锁铨.山地降水的空间分布特征研究综述[J].陕西气象,2004(6):27-30.
- [11] 周锁铨,薛根元,周丽峰,等.基于GIS降水空间分析的逐步插值方法[J].气象学报,2006,64(1):100-111.
- [12] 王菱.华北山区坡地方位和海拔高度对降水的影响[J].地理科学,1996,16(2):150-158.
- [13] 傅抱璞.地形和海拔高度对降水的影响[J].地理学报,1992,47(4):302-314.
- [14] 马蔼乃.地理科学与地理信息科学论[M].武汉:武汉出版社,2000.
- [15] 亚热带东部丘陵山区农业气候资源及其合理利用研究课题协作组.中国亚热带东部丘陵山区农业气候资源研究[M].北京:科学出版社,1989.
- [16] 张宏群,安裕伦.贵州省喀斯特山区水土流失遥感信息模型的建立[J].水土保持通报,2003,23(5):39-42.
- [17] 周锁铨,孙琪,肖桐松,等.长江中上游区基于GIS的不同时间尺度降水插值方法探讨[J].高原气象,2008,27(5):1021-1034.
- [18] 冯强,叶汝杰,王昂生,等.中尺度地形对暴雨降水影响的数值模拟研究[J].中国农业气象,2004,25(4):1-4.
- (上接第133页)
- [7] Yuan Li-feng, Zhang You-shu. Debris flow hazard assessment based on support vector machine[J]. Wuhan University Journal of Natural Sciences, 2006, 11(4): 897-900.
- [8] 王涛,刘兴年,黄尔.基于SVM方法的小流域泥石流输沙量预测[J].水利水电科技进展,2008,28(2):1-3,64.
- [9] Pijush Samui. Slope stability analysis: a support vector machine approach[J]. Environmental Geology, 2008(56):255-267.
- [10] 马文涛.基于PSO和LSSVM的边坡稳定性评价方法[J].岩土力学,2009,30(3):845-848.
- [11] 罗战友,杨晓军,龚晓南.基于支持向量机的边坡稳定性预测模型[J].岩石力学与工程学报,2005,24(1):144-148.
- [12] 马文涛.土坡稳定性分析的SVM方法[J].烟台大学学报:自然科学与工版本,2006,19(1):47-51.
- [13] 马志江,陈汉林,杨树锋.基于支持向量机理论的滑坡灾害预测:以浙江庆元地区为例[J].浙江大学学报:理学版,2003,30(5):592-596.
- [14] 李秀珍,刘希林,苏鹏程.四川凉山州安宁河流域泥石流危险性评价[J].防灾减灾工程学报,2005,25(4):426-430,457.
- [15] 刘希林,莫多闻.泥石流风险评价[M].成都:四川科学技术出版社,乌鲁木齐:新疆科技卫生出版社,2003.