

# 利用 GIS 和多变量分析估算青藏高原月降水

何红艳, 郭志华\*, 肖文发, 郭泉水

(中国林科院森林生态环境与保护研究所, 北京 100091)

**摘要:** 随着空间降水信息需求的日益增加, 空间降水插值已被广泛应用。降水区域不同, 插值方法不同; 时间尺度不同, 插值方法也不相同。适合于所有地区的通用降水插值模型是不存在的。青藏高原自然地理特征独特, 分析高原降水的时空格局意义重要。以青藏高原及其周边地区 140 个气象站点的月降水信息及其该地区的数字高程数据(DEM)为基础, 利用 GIS 工具, 对比分析了五种插值方法在青藏高原不同降水年份(以 1998 年、1997 年分别代表丰水及欠水年份)的干湿季(1998 年的干湿季分别以 12 月份和 8 月份为代表, 1997 年的干湿季分别以 1 月份和 7 月份为代表)月降水插值中的应用, 并对整个高原地区的干季和湿季的月降水进行制图。这 5 种插值方法分别是: 克里金插值法、反距离加权法、样条法、混合插值法 I 和混合插值法 II, 前 3 种插值方法未考虑海拔高度对降水的影响, 而混合插值法则将高程作为降水的重要影响因子。结果表明: 在干季, 无论是丰水还是欠水年份, 月降水量都比较少, 高程对降水量的影响较小, 在月降水插值时可不考虑高程的影响, 克里金法的月降水插值精度最高。在湿季, 月降水量较多, 高程的影响较大, 混合插值法比局部插值法及克里金插值法的精度高, 尤以混合插值法 II(多元回归和样条法的综合)的精度最高。干季, 整个高原的月降水很少, 西部和北部降水最少, 东部和南部相对较多; 湿季, 高原的月降水较多, 空间格局表现为由东南向西北递减。

**关键词:** 月降水量; 局部插值; 混合插值; 青藏高原

文章编号: 1000-0933(2005)11-2933-06 中图分类号: P468.0+24 文献标识码: A

## Mapping monthly precipitation for Tibetan Plateau with GIS and multivariate analysis based on DEM data

HE Hong-Yan, GUO Zhi-Hua\*, XIAO Wen-Fa, GUO Quan-Shui (The Institute of Forest Ecology, Environment and Protection, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China). Acta Ecologica Sinica, 2005, 25(11): 2933~2938

**Abstract** Spatial precipitation interpolation is of interest because it depends on many environmental variables, and there is no universal interpolation model applicable to all the terrains. The spatial availability of interpolation is problematic because the precipitation data was recorded at distributed weather forecast stations. As a result, values at any other point in the terrain must be interpolated from the neighboring stations. Using multiple linear regression and Geographic Information System (GIS), the spatial distributions of monthly precipitation for both wet and dry years in the Tibetan Plateau were modeled. Based on the precipitation data collected by 140 stations for both wet year 1998 and dry year 1997 (Dec. and Aug. for dry and wet months in 1998, Jan. and Jul. for dry and wet months in 1997) and the DEM data of the Tibetan Plateau, a monthly precipitation map of the Tibetan Plateau was drawn. Five interpolation methods were compared in this study and they were Kriging, Inverse Distance Weighting (DW), Splines, and two mixed methods. One mixed method is the combination of Multiple Regression and Inverse Distance Weighting, while the other is the combination of Multiple Regression and Splines. Both of the mixed methods take the elevation as an important factor during interpolation, while the former other three methods

基金项目: 国家自然科学基金重大研究计划资助项目(90211006); 国家重点基础研究发展规划资助项目(973 项目)(2002CB412508); 国家自然科学基金面上资助项目(30371141); 国家林业局重点试验室开放基金资助项目

收稿日期: 2004-11-12; 修订日期: 2005-07-10

作者简介: 何红艳(1981~), 女, 湖北安陆人, 硕士生, 主要从事 GIS、GPS 和 RS 在森林生态的应用研究 E-mail: hy-he@163.com

通讯作者 Author for correspondence E-mail: guozh@forestry.ac.cn

Foundation item: National Natural Science Foundation Key Research Plan (No. 90211006), National Natural Science Foundation of China (No. 30371141), National Forestry Administration Key Laboratory Fund

Received date: 2004-11-12; Accepted date: 2005-07-10

Biography: HE Hong-Yan, Master candidate, mainly engaged in application research of GIS, GPS, RS in forest ecology. E-mail: hy-he@163.com

© 1994-2006 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

do not put into consideration of elevation influence. The mixed methods can be summarized into the following formula:  $P = f(B, L, H) + R$ ; where  $P$  refers to precipitation,  $B/L/H$  represents respectively longitude, latitude and elevation, and  $R$  refers to the residual. The validity of the monthly rainfall maps was checked through 10 independent experiment weather stations. The results show: In dry seasons, monthly precipitation was low regardless of wet years or dry years; and the best results for dry monthly precipitation mapping were obtained by using the Kriging interpolation. In wet seasons, monthly precipitation was highly affected by the factor of altitude, therefore, the two mixed methods obtained better results than the former three methods. Furthermore, mixed method II (the combination of Multiple Regression and Splines) got the best result. The spatio-temporal patterns of the Tibetan Plateau in the precipitation maps were discussed. The precipitation in the western and northern Tibetan Plateau was fairly low and that in the eastern and southern Tibetan Plateau was much lower in the dry seasons. The monthly precipitation in wet months decreased as the spatial variation from southeast to northwest of the Tibetan Plateau.

**Key words:** monthly precipitation; local interpolation methods; mixed interpolation methods; Tibetan Plateau

降水的空间分布信息对于区域水资源及旱涝灾害的预测与管理、生态环境治理等都具有重要意义。然而,通常获取的降水信息仅为气象站点的降水数据,要获得整个区域的降水信息,则需利用临近气象站点的降水数据通过插值或其它地理、地形因素间接求得<sup>[1]</sup>。

降水插值方法很多,常见的有克里金插值法(Kriging)、泰森多边形法(Theissen polygons)、反距离加权法(Inverse Distance Weight, DW)、样条法(splines)和多元回归法(multiple regression)等<sup>[1~10]</sup>。其中,克里金插值法有多个变型,不同的克里金插值法(如普通克里金法、通用克里金法、泛克里金法、协同克里金法等)的适用性和优缺点各不相同,协同克里金法和泛克里金法的精度相对较高<sup>[2]</sup>。泰森多边形法(即最临近点插值法)计算简便<sup>[2,3]</sup>,适用于地形大致一致、气象站点密度较高的区域<sup>[4]</sup>。对于气象站点稀疏的区域,反距离加权法有助于提高降水的插值精度<sup>[2~4]</sup>,但该方法同样未考虑地形对降水的影响,故该法不适用于地形起伏较大的区域<sup>[2]</sup>;样条法虽也被广泛使用,但它不能提供误差估计,对研究区域也有特殊的要求<sup>[3,5,6]</sup>;在考虑地形因素影响的情况下,多元回归法比较常用<sup>[1,3,4,7,8]</sup>;另外,Vicente-Serrano 提出了一种新的降水插值方法——混合插值法,即将整体插值法(如多元回归法)和局部插值法(如反距离加权法、样条法)结合起来<sup>[9]</sup>。

青藏高原独特的自然地理特征不仅对本区而且对其毗邻地区产生深刻影响,同时,月降水信息对区域乃至全球植被生产力及生态系统碳循环的研究具有重要作用<sup>[11~14]</sup>。因此,分析青藏高原月降水的时空格局及其变化规律具有重要意义。本文以青藏高原地区<sup>[15]</sup>为研究对象,对比分析不同插值方法在该地区干季和湿季月降水插值的适用性与精度,力图寻找适合青藏高原地区的月降水插值方法,并对高原的月降水进行制图,进而为分析整个青藏高原月降水和植被生产力的时空格局及其动态变化规律奠定基础。

## 1 数据与方法

### 1.1 数据

月降水量数据来自国家气象局,包括青藏高原及周边地区140个观测站(图1)自建站至2001年12月逐月的降水观测数据。高原西部的气象站点较少、地势起伏相对较小,东部和南部的降水站点相对比较密集、地势起伏大。数字高程(DEM)数据的精度为1km。

较强的降水季节变化可能会导致干季和湿季的降水插值方法不同<sup>[9,16]</sup>。1982年到2001年间,1997年受厄尔尼诺现象的影响,高原的降水最少,平均为454.5 mm;1998年降水最多,平均为561.3 mm。因此,选择1997年和1998年的月降水数据来探讨高原地区干季和湿季降水插值方法。由图2可知,在1997年,1月份降水最少,7月份降水最多;而在1998年,12月份降水最少,8月份降水最多。因此,本文分别以1997年1月和7月以及1998年12月和8月代表高原的干季(10月至翌年5月份)<sup>[11]</sup>和湿季(6~9月份)<sup>[11]</sup>,对比分析高原干湿季的月降水插值方法,力图探讨整个青藏高原地区月降水的最优插值方法,并对高原的月降水进行制图。



图1 青藏高原及其周边降水站点分布图

Fig. 1 Distribution of precipitation stations in and around Tibet Plateau

## 1.2 插值方法

影响降水的因素很多,如经度、纬度、高程、离水体的距离、坡度、坡向等<sup>[1, 7, 9, 17]</sup>。研究区域不同,影响降水的因子不同,插值方法也不同<sup>[9]</sup>。主要利用局部插值法和混合插值法两种插值方法来探讨高原月降水的空间变化。

**1.2.1 局部插值法** 反距离加权法、样条法和克里金插值法是3种常用的局部插值法。反距离加权法是根据距离衰减规律,对样本点的空间距离进行加权,求得估算点的降水值<sup>[2, 3, 7, 9]</sup>;样条法是通过2个样本点之间的曲线变形达到最佳拟合的插值效果<sup>[4, 5, 6, 9]</sup>;而克里金插值法实际上是一种地学统计方法,该方法认为任何空间连续性变化的属性是非常不规则的,不能用简单的平滑数学函数进行模拟,但是可以用随机表面给予较恰当的描述<sup>[2, 16, 18]</sup>。

在局部插值方法中,分别利用反距离加权法、样条法和克里金插值法对青藏高原月降水进行空间插值,其中:反距离加权法的距离权重指数设为2,站点搜索范围设为临近12个站点;样条法所用的样条为规则样条,指数为0.1,站点搜索范围为临近的12个站点;克里金插值法半方差函数采用指数模型,站点搜索范围为临近的12个站点。

**1.2.2 混合插值法** 青藏高原地形起伏很大,海拔对不同地区不同季节的月降水影响不同。在同一月份,某点的月降水量( $P$ )受其所在位置(经度 $L$ ,纬度 $B$ )和海拔高度( $H$ )的影响<sup>[1, 6, 7, 17]</sup>。在考虑高程值对降水影响的情况下,数学模型  $P = f(L, B, H)$  最适合月降水量的估测<sup>[5, 6, 16]</sup>。混合插值法对  $P$  值进行了残差修正。对残差进行的插值,只能采用不改变观测站点观测值的局部插值法。根据残差的插值方法不同,混合插值法又可分为不同的亚类。本文的残差插值所选用的局部插值法为反距离加权法和样条法,相应的混合插值法表示为混合插值法Ⅰ和混合插值法Ⅱ。

首先,从青藏高原及其周边区域的140个气象站点中选取130个作为插值站点,以130个插值站点的经度( $L$ )、纬度( $B$ )和高程( $H$ )数据,建立 $L, B, H$ 与月降水量 $P$ 之间的多元线型回归方程  $P = f(L, B, H)$ ,并根据该回归模型和青藏高原的DEM来估测整个高原地区的降水量。然后,进行残差修正。方法是:对估测量和实测量之间存在的残差进行插值,将插值后的月降水量残差分布图修正到通过回归模型建立的月降水分布图上,得到修正后的青藏高原月降水分布图。在回归模型中,经度、纬度的单位为度,高程单位为0.1m,降水量单位为0.1mm。

## 1.3 插值检验

从青藏高原及其周边的140个站点中随机选出10个站点作为月降水量插值精度的检验站点,插值则以其余130个站点为基础。根据插值结果,计算或读出10个检验站点的估计值,对比分析观测值与估算值的差异,插值精度由平均绝对误差(MAE)的大小来决定。

本文所有计算和制图都在GIS软件ArcInfo 8.3下进行,回归分析在MATLAB 6.5下进行。

## 2 结果与讨论

### 2.1 干季月降水插值

青藏高原降水的季节变化大,湿季降水多,干季降水少(图2)。

青藏高原干季月降水量很少,很多站点的月降水量在0~1mm之间。在干季,海拔对高原月降水的影响很小,因而以高程为数据源的多元回归法及相应的混合插值法不适合。

**2.1.1 丰水年份** 1998年是1982年到2001年降水最多的一年,是一个丰水年。1998年12月,青藏高原及附近地区140个气象站点的平均降水量为2.4mm,最高为21.9mm,其中40个气象站点的降水为0mm。

用反距离加权法、样条法和克里金插值法进行月降水插值,青藏高原1998年12月的降水分布格局如图3(a1, b1, c1)所示。

**2.1.2 欠水年份** 受厄尔尼诺影响,1997年青藏高原降水很少。1997年1月,青藏高原及附近地区140个气象站点的平均降水量为3.2mm,最高为18.6mm,其中29个站点的降水为0mm。

用反距离加权法、样条法和克里金插值法对1997年1月份的降水进行插值,高原在该月的降水分布格局见图3(a2, b2, c2)。

**2.1.3 精度检验及降水的空间格局** 用上述3种插值方法对1998年12月份和1997年1月份月降水插值后10个检验站点的误差见表1。

由表1可知:在各检验站点,不同的插值方法的误差变化趋势一致;无论1998年12月还是1997年1月降水插值,样条法的平均绝对误差都最大,插值精度最低;对于1998年12月和1997年1月降水,克里金插值法的平均绝对误差最小,插

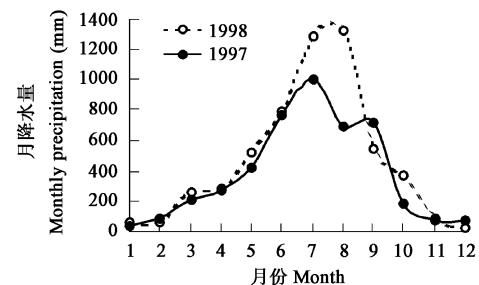


图2 1997年及1998年月降水

Fig. 2 Monthly precipitation in 1997 and in 1998 of Tibet

值精度最高。

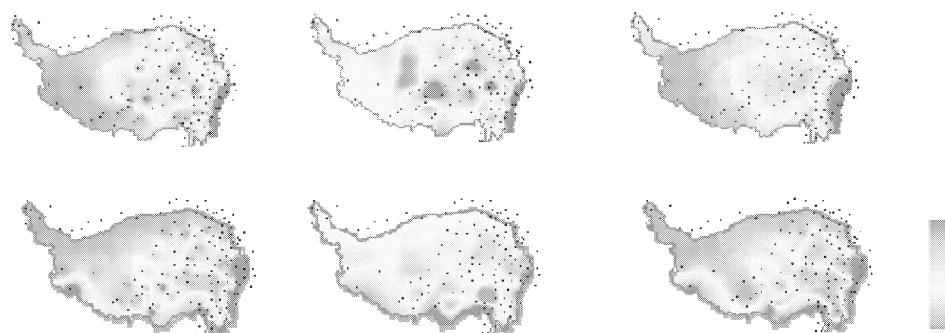


图 3 3 种插值方法下的 1989 年 12 月份降水和 1997 年 1 月份降水

Fig. 3 Precipitation in Dec., 1998 and in Jan., 1997 by three interpolation methods

a1 反距离加权法 inverse distance weighting; b1 样条法 splines; c1 克里金插值法 Kriging; a2 反距离加权法 inverse distance weighting; b2 样条法 splines; c2 克里金插值法 Kriging

表 1 1998 年 12 月份和 1997 年 1 月份降水不同插值方法插值结果的误差统计(0.1mm)

Table 1 Precipitation error statistics for interpolation by different methods in Dec., 1998 and Jan., 1997

气象站点 Weather stations	经度 Longitude (°)	纬度 Latitude (°)	海拔 Altitude (m)	M 12		M 1		A E (idw)		A E (spline)		A E (kriging)	
				1998	1997	1998	1997	1998	1997	1998	1997	1998	1997
皮山 Pishan	78.28	37.62	1375	2	0	5	0	12	1	8	0		
日喀则 Rikaze	88.88	29.25	3836	0	0	4	20	10	17	7	11		
那曲 N aqu	92.07	31.48	4507	17	86	13	63	57	69	5	56		
泽党 Zedang	91.77	29.25	3552	0	23	11	3	14	22	7	7		
华坪 Huaping	101.27	26.63	1245	47	36	20	2	47	20	12	7		
昭觉 Zhaojue	102.85	28.00	2132	87	84	15	11	9	23	15	2		
岷县 Minxian	104.02	34.43	2315	0	41	10	5	9	20	13	4		
景泰 Jingtai	104.05	37.18	1631	0	10	3	8	9	25	3	15		
华家岭 Huajialing	105.00	35.38	2451	0	65	4	38	4	15	7	24		
巴塘 Batang	99.10	30.00	2589	0	0	14	16	7	69	17	1		
平均绝对误差(MAE) Mean absolute error						9.9	16.6	17.8	28.1	9.4	12.7		

M 12 和 M 1 分别表示 12 月和 1 月降水量的实测值, A E (idw)、A E (spline) 和 A E (Kriging) 分别表示用反距离加权法、样条法和克里金插值法插值时的绝对误差 M 12 and M 1 are the observed values in Dec. and Jan., A E (idw), A E (spline) and A E (Kriging) are the absolute errors for the interpolation methods of inverse distance weighting, splines and Kriging

综上所述, 在青藏高原, 无论是在丰水年份还是欠水年份, 克里金插值法都是干季月降水插值的理想方法。

由图 3(c1, c2) 可知, 尽管 1998 年是丰水年, 1997 年是欠水年, 然而 1997 年 1 月的降水比 1998 年 12 月的降水多。总体上, 青藏高原干季月降水很少, 西部和北部的降水最少, 东部和南部的降水相对多些。

## 2.2 湿季月降水插值

青藏高原湿季月降水较多, 海拔高度对降水的影响较大, 因此, 混合插值法比较合适, 因为月降水的混合插值模型中将海拔作为一个重要因素。

**2.2.1 丰水年份湿季月降水** 1998 年 8 月为该年高原降水最多的月份。1998 年 8 月, 青藏高原及附近地区 140 个气象站点的平均降水量为 133.0 mm, 最高为 451.1 mm, 最低为 0.9 mm。

用混合插值法 I (多元回归法和反距离加权法的混合)、混合插值法 II (多元回归法和样条法的混合)、反距离加权法、样条法和克里金插值法对 1998 年 8 月份的降水插值, 青藏高原丰水年份湿季的降水分布如图 4(a1-e1) 所示。

**2.2.2 欠水年份湿季月降水** 1997 年 7 月为高原该年降水最多的月份。1997 年 7 月, 青藏高原及附近地区 140 个气象站点的平均降水量为 100.7 mm, 最高为 466.4 mm, 最低为 0.4 mm。

用混合插值法 I (多元回归法和反距离加权法的混合)、混合插值法 II (多元回归法和样条法的混合)、反距离加权法、样条法和克里金插值法对 1997 年 7 月的降水插值, 青藏高原欠水年份的降水分布如图 4(a2-e2) 所示。

**2.2.3 精度检验及降水的空间格局** 由上述分析可知, 无论是在丰水年份还是欠水年份, 海拔高度对高原湿季月降水的影响均不可忽视。

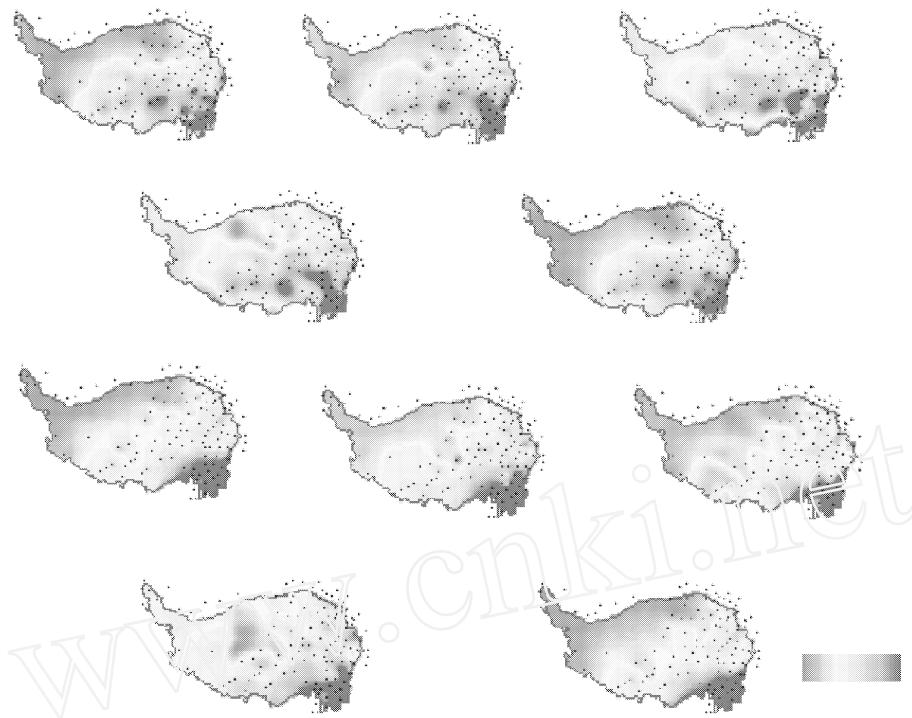


图 4 5 种插值方法下高原 1998 年 8 月的降水和 1997 年 7 月的降水

Fig. 4 Precipitation in August, 1998 and in July, 1997 by five interpolation methods

a1 反距离加权法 inverse distance weighting; b1 混合插值法 I mixed method 1; c1 样条法 splines; d1 混合插值法 II mixed method; e1 克里金插值法 Kriging; a2 反距离加权法 inverse distance weighting; b2 混合插值法 I mixed method 1; c2 样条法 splines; d2 混合插值法 II mixed method 2; e2 克里金插值法 Kriging

用 5 种插值方法对 1998 年 8 月和 1997 年 7 月的月降水插值后, 10 个检测站点月降水的实测数据与估测结果误差见表 2。由表 2 可知: 无论是 1998 年 8 月还是 1997 年 7 月, 混合插值法 II 的平均绝对误差都最小, 精度最高; 在 10 个检测站点中, 虽然总体上混合插值法比其对应的局部插值法的效果好, 但是并不是对于每一个检测站点, 混合插值法的效果都比其对应的局部插值法的效果好; 对于 1998 年 8 月份的降水, 样条法的平均绝对误差最大; 对于 1997 年 7 月份的降水, 克里金插值法的平均绝对误差最大。

表 2 1998 年 8 月和 1997 年 7 月份降水不同插值方法插值结果的误差统计(0.1mm)

Table 2 Precipitation error statistics for interpolation by different methods in Aug 1998 and Jul 1997

站点名称 Weather stations	M 8 1998	M 7 1997	AE(idw) 1998 1997		AE(m idw) 1998 1997		AE(spline) 1998 1997		AE(mspline) 1998 1997		AE(krig) 1998 1997	
			1998	1997	1998	1997	1998	1997	1998	1997	1998	1997
皮山 Pishan	169	4	6	43	124	151	47	73	74	98	70	46
日喀则 Rikaze	2808	731	1136	55	1137	57	1036	306	1003	196	1059	123
那曲 N aqu	1598	862	179	173	176	155	379	73	151	48	151	163
泽党 Zedang	2807	773	1021	13	947	62	881	61	843	70	1019	45
华坪 Huaping	4399	3705	1724	802	1198	593	2101	68	772	261	1784	599
昭觉 Zhaojue	2487	2147	398	352	341	287	1169	205	202	94	180	317
岷县 Minxian	1385	568	173	373	20	303	105	224	89	221	262	223
景泰 Jingtai	719	954	65	117	65	136	215	43	343	60	53	231
华家岭 Huajialing	910	1104	457	278	104	270	658	827	545	584	763	546
巴塘 Batang	3050	1340	918	205	569	96	1222	39	329	28	857	139
平均绝对误差(MAE) Mean absolute error	607.7	241.1	468.1	211	781.3	191.9	435.1	166	619.8	243.2		

M 7 和 M 8 分别表示 7 月和 8 月降水量的实测值, AE(idw)、AE(m idw)、AE(spline)、AE(mspline) 和 AE(Kriging) 分别表示用反距离加权法、混合插值法 I、样条法、混合插值法 II 和克里金插值法插值时的绝对误差 M 7 and M 8 are the observed values in July and August; AE(idw), AE(m idw), AE(spline), AE(mspline) and AE(Kriging) are the absolute errors for the interpolation methods of inverse distance weighting, mixed method I, splines, mixed method II and kriging.

总体来讲,对于青藏高原湿季月降水,无论是丰水年份还是欠水年份,混合插值法 II(样条法和多元回归法的综合)的效果最好。由图 4(d1, d2)可知,青藏高原湿季月降水东南地区较多,西北地区较少,呈现从东南向西北递减趋势,但是在新疆、西藏和青海三省交界处有一个较低的雨区。

### 3 结论

(1)无论是在丰水还是欠水年份,在湿季降水插值时,混合插值法比相应的局部插值法的精度高,这是因为混合插值法考虑了海拔高度对降水的影响。

(2)青藏高原干季和湿季月降水的最优插值方法不同,干季月降水插值可不考虑海拔的影响,克里金插值法的精度最高;湿季月降水采用混合插值法 II(样条法和多元回归法的综合)的精度最高。

(3)青藏高原干季的月降水很少,西部和北部降水最少,东部和南部相对多一点;湿季月降水格局是西北地区降水较少、东南降水较多、从东南向西北递减的趋势。

与其它的研究相比,N guyen 认为对于加里福利亚州圣巴巴拉郡的降水插值,回归分析法的精度比反距离加权法的精度要高<sup>[8]</sup>;而在埃布罗河流域中部的月降水和年降水插值时,V icente-Serrano 的研究却显示回归分析法的精度不高,样条法在局部插值法中误差最小<sup>[9]</sup>。这些都与青藏高原月降水的最优插值方法不同。因此,研究区域不同,最优的降水插值方法不尽相同。

总之,对于某一研究区域,应该根据具体情况不同比较不同插值方法的插值效果,进而选出最适合该区域的插值方法。

### References

- [1] Marquínez J, Lastra J, Garcá P. Estimation models for precipitation in mountainous regions: the use of GIS and multivariate analysis. *J. Hydrol.*, 2003, **270**: 1~11.
- [2] Goovaerts P. Geostatistical approaches for incorporating elevation into the spatial interpolation of rainfall. *J. Hydrol.*, 2000, **228**(1-2): 113~129.
- [3] Hasenauer H, M erganicova K, Petritsch R, et al. Validation daily climate interpolations over complex terrain in Austria. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2003, **119**(1-2): 87~107.
- [4] Hargrove W W. Interpolation of Rainfall in Switzerland using a Regularized Spline with Tension. <http://research.esd.ornl.gov/~haw/sic97/>
- [5] Hutchinson M F. Interpolation of Rainfall Data with Thin Plate Smoothing Splines Part I: Two Dimensional Smoothing of Data with Short Range Correlation. *Journal of Geographic Information and Decision Analysis*, 1998, **2**(2): 139~151.
- [6] Hutchinson M F. Interpolation of Rainfall Data with Thin Plate Smoothing Splines Part II: Two Dimensional Smoothing of Data with Short Range Correlation. *Journal of Geographic Information and Decision Analysis*, 1998, **2**(2): 152~167.
- [7] Daly C, Helmer E H, Quñones M. Mapping the climate of Puerto Rico, Vieques and Culebra. *Int J. Climatol.*, 2003, **23**(11): 1359~1381.
- [8] Nguyen R T, Prentiss D, Shively J E. Rainfall Interpolation for Santa Barbara County. <http://www.geog.ucsb.edu/~dylan/rainfall/rainfall.htm>
- [9] Vicente-Serrano S M, Saz-Sánchez M A, Cuadrat J M. Comparative analysis of interpolation methods in the middle Ebro Valley (Spain): application to annual precipitation and temperature. *Clim. Res.*, 2003, **24**(2): 161~180.
- [10] Eleanor R, Cross M S, Rick Perrine B S. Predicting Areas Endemic for Schistosomiasis Using Weather Variables and a Landsat Data Base. *Military Medicine*, 1984, **149**(10): 542~545.
- [11] Hanqin Tian, Melillo J M, Kicklighter D W, et al. Effect of interannual climate variability on carbon storage in Amazonian ecosystems. *Nature*, 1998, **396**(6712): 664~667.
- [12] Sato Y S, Yamashita F, Sugiura Y, et al. FB-assisted TEM study of an oxide array in the root of a friction stirwelded alum inum alloy. *Scripta materialia*, 2004, **50**(3): 365~369.
- [13] Band Forest ecosystem processes at the watershed scale: basis for distributed simulation. *Ecological Modelling*, 1991, **56**: 171~196.
- [14] Shaw M R, Zavaleta E S, Chiarucci N R, et al. Grassland responses to global environmental changes suppressed by elevated CO<sub>2</sub>. *Science*, 2002, **298**(5600): 1987~1990.
- [15] Zhang Y L, Li B Y, Zheng D. A discussion on the boundary and area of the Tibetan Plateau in China. *Geographical Research*, 2002, **21**(1): 1~8.
- [16] Jeffrey S J, Carter J O, Moodie K B, et al. Using spatial interpolation to construct a comprehensive archive of Australia climate data. *Environmental Modelling & Software*, 2001, **16**(4): 309~330.
- [17] Fedorovskiy A. Estimating areal average rainfall for an ungaged mountainous basin in the Amur Basin. *J. Environ. Hydrol.*, 1998, **6**: 5~15.
- [18] Prudhomme C, Duncan W R. Mapping extreme rainfall in a mountainous region using geostatistical techniques: a case study in Scotland. *Int J. Climatol.*, 1999, **19**(12): 1337~1356.
- [19] Wong K W, Wong P M, Gedeon T D, et al. Rainfall prediction model using soft computing technique. *Soft Computing*, 2003, **7**: 434~438.
- [20] Burrough P A, McDonnell R A. *Principles of geographical information systems*. New York: Oxford University Press, 1998.
- [21] Lanza L G, Ramírez J A, Todini E. Stochastic rainfall Interpolation and downscaling. *Hydro Earth System Sci.*, 2001, **5**(2): 139~143.
- [22] Lin G F, Chen L H. A spatial interpolation method based on radial basis function networks incorporating a semivariogram model. *J. Hydrol.*, 2004, **288**: 288~298.
- [23] Goodale C L, Alber J D, Ollinger S V. Mapping monthly precipitation, temperature, and solar radiation for Ireland with polynomial regression and a digital elevation model. *Clim. Res.*, 1998, **10**: 35~49.
- [24] Bertacchi Uvo C, Olsson J, Morita O, Jinno K, Kawamura A, Nishiyama K, Korreda N, Nakashima T. Statistical atmospheric downscaling for rainfall estimation in Kyushu Island, Japan. *Hydro Earth System Sci.*, 2001, **5**: 259~271.

### 参考文献:

- [15] 张镱锂, 李炳元, 郑度. 论青藏高原的范围和面积. 地理研究, 2002, **21**(1): 1~8.