

基于 Anusplin 秦岭地区近 50 多年来的降水时空变化

孟清^{1,2}, 白红英^{1,2}, 郭少壮^{1,2}

(1.西北大学 城市与环境学院, 西安 710127; 2.西北大学 陕西省地表系统与环境承载力重点实验室, 西安 710127)

摘 要:为了更精确地评估山地生态系统,降水栅格数据的获取显得尤为重要。基于澳大利亚专业气象插值软件 Anusplin,以秦岭 1959—2015 年 31 个气象站点的降雨资料为基础,获得秦岭地区降水栅格数据以揭示秦岭地区降水的时空变化规律。结果表明:(1) 秦岭地区年均降水的变化范围为 545.44~1 155.46 mm,平均降雨量为 824.76 mm;南坡平均降雨量为 847.37 mm,北坡平均降雨量为 737.25 mm,南北坡平均降水差异为 110.12 mm;秦岭山地四季平均降水量大小依次为:夏(403.76 mm)>秋(237.26 mm)>春(169.11 mm)>冬(25.62 mm),且南坡降水大于北坡降水。(2) 1959—2015 年秦岭地区年均降水变化率为 $-3.02\sim 0.83$ mm/10 a,并未通过显著性检验,降水减少区域主要在秦岭主峰太白山和秦岭南坡的安康等地,平均海拔分布在 1 177 m;而降水增多发生地主要在秦岭南坡的略阳、商南和石泉等地,平均海拔分布在 811 m。其中秦岭地区东部商南地区变化率最大,达到 0.83 mm/10 a。

关键词:气候变化;降水插值;Anusplin;秦岭地区;时空变化

中图分类号:P426.61

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2020)02-0206-07

Spatial-temporal Variation of Precipitation in Qinling Area in Recent 50 Years Based on Anusplin

MENG Qing^{1,2}, BAI Hongying^{1,2}, GUO Shaozhuang^{1,2}

(1.School of Urban and Environment, Northwest University, Xi'an 710127, China; 2.Key Laboratory of Shaanxi Surface System and Environmental Carrying Capacity, Northwest University, Xi'an 710127, China)

Abstract: In order to evaluate the ecosystem in mountainous area precisely, the acquisition of precipitation grid data is particularly important. By using the data of precipitation in 31 meteorological stations in Qinling area from 1959—2015, the spatial-temporal variation of precipitation in Qinling region was studied based on the precipitation data interpolated by the professional meteorological interpolation software named Anusplin and made from Australia. The results were as follows. The change range of annual precipitation was 545.44 mm to 1 155.46 mm, and average rainfall was 824.76 mm. The average rainfall was 847.37 mm in the southern slope and 737.25 mm in the northern slope, and the difference of average precipitation between north and south slopes is 110.12 mm. The average precipitation in the four seasons in Qinling Mountains decreased in the order: summer (403.76 mm)>autumn (237.26 mm)>spring (169.11 mm)>winter (25.62 mm), and the precipitation in the southern slope was greater than that in the northern slope. Range of annual precipitation change rate was -3.02 mm/decade to 0.83 mm/decade in Qinling area from 1959 to 2015, and the regions with precipitation reduction mainly distributed in Taibai Mountain, which is the peak of Qinling Mountains and in Ankang in the southern slope of the Qinling Mountains, and the average elevation of these region is 1 177 m, while the regions with increased precipitation mainly distributed in the southern region of Qinling Mountains, Lueyang, Shangnan and Shiquan counties, and the average elevation of these regions is 811 m. The largest change rate reaching up to 0.83 mm/decade was found in Shangnan in the eastern part of Qinling Mountains.

Keywords: climate change; precipitation interpolation; Anusplin; Qinling area; spatial-temporal variation

收稿日期:2019-03-26

修回日期:2019-05-03

资助项目:国家林业公益性行业科研专项“秦岭天然林气候变化的时空响应及管理政策”(201304309)

第一作者:孟清(1993—),女,陕西西安人,博士,研究方向为秦岭地区气候变化和大气研究。E-mail:qingmengmq@163.com

通信作者:白红英(1962—),女,陕西凤翔人,博士,教授,主要从事全球变化生态学、自然地理学等方面的科研与教学。E-mail:hongyingbai@163.com

降水作为最重要的气象要素之一,是气象学、水文学、植被学和生态学等学科领域研究过程中的重要参数之一。而详尽的降水数据,特别是数字化的降水量是支撑多种生态系统模型和径流模拟最主要的设置参数,也是气候变化研究的重要指数,如何获得精度较高的栅格数据成为气候变化研究中的关键问题之一。随着地理学科的发展和 GIS 技术的进步,空间插值方法应运而生,空间内插就是基于某种数理方法采用已知的气象点数据来推求其未知的气象点数据,从而把矢量数据转换成栅格数据^[1]。

常用的气象插值方法有克里金插值法(Kriging)、反距离加权法(Inverse Distance Weighting, IDW)和样条函数法(Spline)等。目前,国内外对气象要素插值方法的研究有很多,关于气温插值通常采用普通克里格方法^[2-6],然而对于降水插值方法的使用一直处于选择阶段,没有一个确定的标准模型。

Daly 等^[7]对比加勒比海地区的年、月降水以及最高温和最低温插值的结果发现 PRISM (Parameter-elevation Regressions on Independent Slopes Model, PRISM) 模型的插值效果优于 IDW 方法。Marquínez 等^[8]基于多元回归方法和 GIS 技术手段对西班牙坎塔布连山区降水进行插值分析,结果表明多元回归法能够估计无气象站点地区的降水信息,并且指出地形对降水有主要的影响作用。石朋^[9]、刘智勇^[10]等都认为协同克里金方法的降水插值效果优于距离平方倒数法和普通克里金法。庄立伟等^[11]在对东北逐日降水插值中认为 IDW 方法要优于克里格方法。王江^[12]、谭剑波^[13]、蔡福^[14]等对比分析了基于 Anusplin 的薄盘样条法(Thin Plate Spline, TPS)与传统插值方法对降水数据进行插值比较,结果都一致认为 TPS 法对基本气象要素的插值误差最小。姜晓剑^[15]、刘志红^[16]、钱永兰^[17]等针对基于薄盘样条法的 Anusplin 降水插值,分析了 TPS 的误差和应用。

由于前人研究结果具有可靠性,但是不同的研究人员选取的研究方法不同,研究区域存在地形差异及数据时间尺度和空间尺度来源不一致,所得降水插值的精度误差也不同。就目前降水插值的研究方法来说,普通克里金方法很少考虑地形因素的影响;PRISM 适宜于地形起伏较大的地方;多元回归分析的优点在于估算的降水量不依赖于估算点周围区域气象站点的密集程度,可以直接根据地形参数求出降水量;而基于 Anusplin 的薄盘样条法是一种采用平面平滑样条函数对多变量数据进行分析 and 插值的工具,它不仅考虑了地形对降雨量的影响,而且考虑了气象站点分布及数量对降水插值的影响,且有研究表明 Anusplin 对降水的

插值结果优于其他几种插值方法^[18-21]。

秦岭山地作为中国南北分界线,北仰南俯,相对高差大、最高海拔为 3 771.2 m,由于长期缺乏高山气象站点,导致秦岭山地栅格降雨量数据难以获取。同时秦岭地区的降雨量对于全国的水热平衡、植被生长和农作物的产量等具有重要的影响作用。因此本文基于 Anusplin 软件以秦岭山地为研究对象,以 DEM 数据和 31 个气象站点 1959—2015 年的降水数据为基础,评估 Anusplin 插值方法在秦岭山地的适用性,阐明秦岭地区 56 年来降雨量的时空分布特征和变化趋势,旨在为探索全球变化和局地小气候的相关研究提供科学依据和理论支撑。

1 研究区概况

本文所选区域为秦岭腹地(图 1),俗称“小秦岭”,位于东经 103°48′—113°04′,北纬 32°25′—35°16′。秦岭是中国南北分界线,是 1 月 0℃等温线、800 mm 等降水量线以及北亚热带和暖温带的分界线,同时还是长江水系和黄河水系的分水岭等^[22]。秦岭山地具有北仰南俯的特征,分布着海拔 2 500 m 以上的中山和 3 000 m 以上的高山^[23],最高海拔为太白山的拔仙台,海拔 3 771.2 m。秦岭地区年均降水量 600~1 200 mm,汛期 6—9 月的降水量占全年的 60%左右,降水变率大,季节分配不均匀^[24]。由于秦岭山体庞大,冬季能阻挡寒冷的西伯利亚寒流南下,使南方减少冻害;夏季又可以阻挡太平洋上湿润的水汽北上,使得中国南北出现了不同的气候类型和植被类型^[25]。

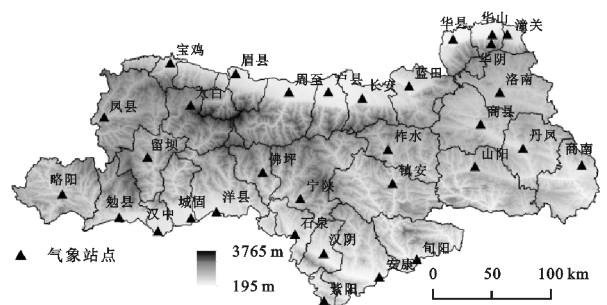


图 1 研究区及气象站点分布

2 研究方法与数据来源

2.1 Anusplin 插值方法

Anusplin 是一种采用平面平滑样条函数对多变量数据进行分析 and 插值的工具,它最早是由澳大利亚学者 Hutchinson 在总结前人经验基础上研发的。Anusplin 是基于普通薄盘和局部薄盘样条函数插值理论。局部薄盘光滑样条是对薄盘光滑样条原型的扩展,它除通常的样条自变量外,允许引入线性协变量模型,如温度和海拔之间、蒸发量与水汽压差的相关关系。

局部薄盘光滑样条的理论模型表述如下:

$$z_i=f(x_i)+b^Ty_i+e_i\quad(i=1,\cdots,N)\quad(1)$$

式中: z_i 为位于空间*i*点的因变量; x_i 为*d*维样条独立变量; f 为要估算的关于*x_i*未知光滑函数; y_i 为*p*维独立协变量; b 为*y_i*的*p*维系数; e_i 为具有期望值为0的自变量随机误差。

当公式(1)中缺少第2项,即协变量($p=0$)时,模型简化为普通薄盘光滑样条;当缺少第1项独立自变量时,模型变为多元线性回归(Anusplin中不允许这种情况出现)^[26]。本文在对降水进行插值时,使用三变量局部薄盘光滑样条函数(经度和纬度为自变量,海拔高度为协变量),样条次数设置为2。

2.2 一元线性回归分析法

此方法可以对降水栅格图中的每个像元的变化趋势进行模拟,采用最小二乘法计算其倾向值,用来估计时间序列与降水序列的回归系数^[27]。

2.3 误差分析

分别使用2013—2015年位于南坡的城固、丹凤、位于北坡的华阴3个未参与插值的低海拔样点和红河谷、太洋公路2个中、高海拔样点来检验误差,通过根均方差(root mean square error, RMSE)和平均绝对误差(mean absolute error, MAE)2个指标来评估秦岭地区降水插值的效果,通过3*a*标准差来评估秦岭地区降水插值误差的稳定性。

$$RMSE=\sqrt{\frac{1}{2}\sum_{i=1}^n(O_i-E_i)^2}\quad(2)$$

$$MAE=\frac{1}{2}\sum_{i=1}^n(|Q_i-E_i|)\quad(3)$$

2.4 数据来源及预处理

本文所研究的降水数据来源于陕西气象局1959—2015年12个月数据,31个气象站点,其中秦岭南坡22个、北坡9个,气象站点如图1所示。剔除不连续、冗余及错误的数 据,对数据进行一致性检验。对原始数据进行标准偏度系数分析,当偏度系数>0时,表示降水变化更趋向正值,呈正偏态分布;当偏度系数=0时,呈正态分布;当<0时,表示降水变化呈负偏态分布^[28-29]。正态性检验的方法有多种,W检验(Shapiro-Wilk检验)适合于小样本($n\leq 10$),本文采用Kolmogorov-Smirnov检验法。检验结果表明秦岭山地1959—2015年年降水量数据符合正态分布($p>0.05$)(表1),所以对原降水数据无需进行变换。

表 1 降水偏系数检验结果

偏度	峰度	K-S 检验(<i>p</i> 值)	结论
0.71	0.86	0.2, 通过	正态

DEM数据分辨率为25 m×25 m,数据来源于陕

西省测绘地理信息局,本文以此为基础根据研究需要,重采样分辨率为500 m×500 m。

3 结果与分析

3.1 多年年均降水栅格空间分布特征

依据Anusplin方法,得到了秦岭地区1959—2015年57*a*的年、季均降水栅格空间分布(图2),其栅格分辨率为500 m×500 m。经对图2空间分析可知,秦岭地区57*a*多年年平均降水的范围为545.44~1 155.46 mm,平均降雨量为824.76 mm,空间分布总体呈现南丰北少的分布,其中西南部降水较多。南坡57*a*年均降水的变化范围为601.97~1 155.46 mm,平均降雨量为847.37 mm;而北坡降水变化范围为545.44~1 061.84 mm,平均降雨量为737.25 mm,即南坡降水明显多于北坡110.12 mm左右。秦岭山地四季平均降水量大小依次为:夏(403.76 mm)>秋(237.26 mm)>春(169.11 mm)>冬(25.62 mm),且南坡降水大于北坡降水。以往的研究表明^[30],秦岭山地是800 mm分界线,北坡年均降雨量小于800 mm,南坡大于800 mm,本文所获得的降雨量与前人的研究结果基本一致。但经过对图2像元统计分析后发现,南坡亦有降雨量小于800 mm的像元数53 051个,占总像元的29.34%,主要分布在洛南和商州区等地区;北坡降雨量大于800 mm的像元数有14 106个,占总像元的29.7%,分布在长安、户县和周至的南部地区。虽然获得的栅格数据比实测点数据更能全面地反映秦岭地区多年降水的空间分布,但其精度还需进一步的检验。

3.2 降水栅格数据集的误差检验

3.2.1 系统自检验 图3为系统输出误差图,从图中可以看出,误差范围为0.01~0.03 mm,表明系统自检验合格,但误差与海拔密切相关,如秦岭主峰太白山的误差最大,为检验获取的栅格降水数据集的准确性与科学性,本文进一步用实测样本来进行误差检验。

3.2.2 实测样本检验

(1)中低海拔样点误差检验。由于秦岭气象站点大多数分布在400~1 000 m的中低海拔地区,为了进一步检验插值的准确性,应用2013—2015年3个未参加插值的观测站点(位于南坡的城固、丹凤和位于北坡的华阴)为样点,与栅格图对应样点进行误差分析。误差通过RMSE和MAE来表示,表2显示了二者之间的月误差,结果表明,处于夏秋季节误差大于春冬误差,出现这一现象的原因可能是秦岭地区夏秋季节雨水充沛且多暴雨,不确定较多,冬春寒冷而干燥、降雨量有限。由标准差结果可知(表3),3*a*来

华阴县降水最为稳定,丹凤县最不稳定;降水标准差基本在 20 mm 以内。

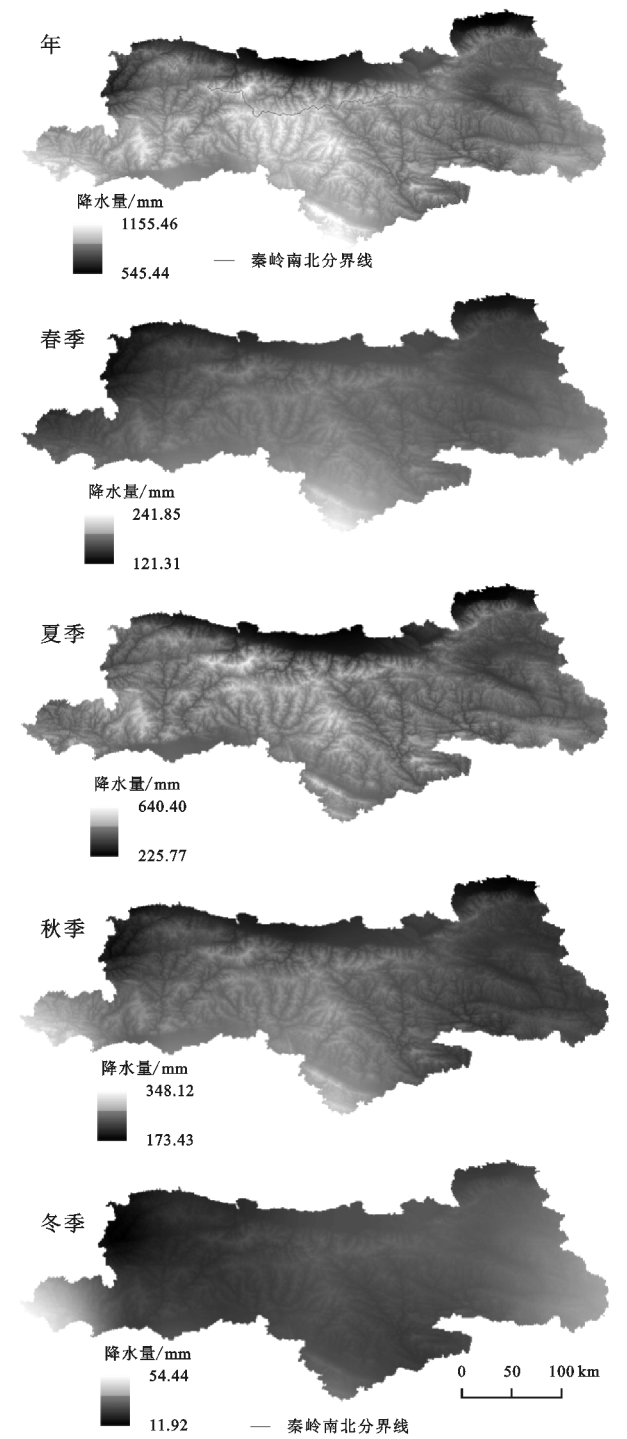


图 2 1959—2015 年秦岭地区年、季均降水量空间分布

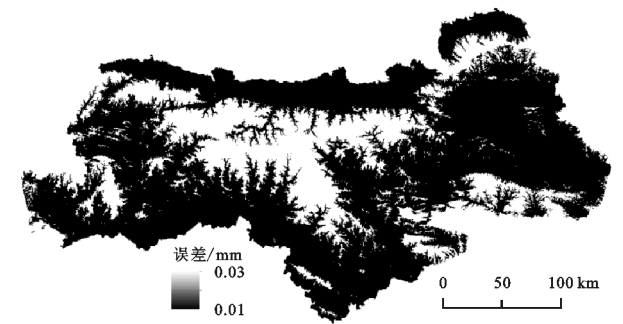


图 3 1959—2015 年秦岭地区年均降水量预测误差

(2) 高山样点误差检验。长期时间内,由于秦岭高山站点稀缺,无站点观测资料,但另一方面秦岭由于山体高大,地理环境复杂,林线区对气候变化响应敏感,本文为了进一步验证秦岭地区降水插值精度,选取未参加插值的太白山 2 个中高海拔样点(红河谷和太洋公路)仅有的近 3 a 的气象资料来进行验证。由表 4 可知,处于夏秋季节的误差大于春冬误差,这一结果与低海拔误差检验的结论一致。降水标准差范围基本在 30 mm 内。

通过自检验、中低样点误差检验和高山样点误差检验,表明误差在范围内,栅格数据集比较科学。

3.3 基于降水数据的 3 种插值方法的比较

为进一步说明 Anusplin 的插值精度,选取气象学常用的两种插值方法进行横向对比分析,两种插值方法分别是普通克里金插值法(Ordinary Kriging, OK)和反距离加权法(Inverse Distance Weighted, IDW),对秦岭山地 57 a 年均降水量进行空间插值,如图 4 所示,再分别对 3 种插值结果的 29 个站点实测值和插值进行相关分析,结果发现,基于普通克里金、反距离加权法和 Anusplin 插值法的降水结果精度具有差异性(图 5)。Anusplin 的精度最优,相关性为 0.99;其他两种方法的相关性均为 0.91。由图 4 可知,基于 3 种插值方法的秦岭山地 57 a 年均降水均呈南丰北少。陕南的安康和汉中因受纬度、地形和海拔,降水量呈高值,而秦岭北麓及东部商洛地区降水较少。Anusplin 方法在空间分布上明显比其他两种方法平滑,更清晰地表达出秦岭山区降水的分布状况,而其他两种方法的插值结果均出现了“牛眼”。由此可见,Anusplin 插值法更适合秦岭地区的降水插值。

表 2 中低样点 2013—2015 年各月值误差对比

年份	误差指标	1 月	2 月	3 月	4 月	5 月	6 月	7 月	8 月	9 月	10 月	11 月	12 月
2013	RMSE	0.40	3.84	1.96	11.44	21.85	32.11	59.55	17.16	30.77	8.92	6.12	0.40
	MAE	0.26	2.46	1.41	7.88	16.03	18.92	40.50	13.38	20.17	6.58	4.54	0.26
2014	RMSE	0.32	6.58	5.72	16.45	4.50	23.97	22.56	29.91	37.41	0.72	6.90	0.65
	MAE	0.18	4.30	4.18	10.94	3.52	16.13	12.44	21.09	30.34	8.40	4.85	0.44
2015	RMSE	5.71	3.92	12.71	20.04	29.26	17.78	30.98	35.23	26.78	12.05	7.95	0.77
	MAE	4.21	2.81	8.46	15.35	18.76	13.72	20.56	22.70	15.65	8.767	5.69	0.50

表 3 中低样点 2013—2015 年降水插值结果与实测结果的标准差对比

站点	海拔/ m	2013 年 降水/mm	2014 年 降水/mm	2015 年 降水/mm	降水 求和/mm
华阴	351.3	11.78	10.20	7.63	29.60
城固	486.4	14.76	15.55	18.32	48.63
丹凤	581.4	20.64	16.56	19.18	56.38

3.4 1959—2015 年秦岭地区降水变化特征

由一元线性回归方法经过 ArcGIS 10.3 处理,获得了秦岭地区 57 a 的年、季均降水量变化率分布(图 6)。

表 4 高山样点 2013—2015 年各月值误差对比

年份	误差指标	1 月	2 月	3 月	4 月	5 月	6 月	7 月	8 月	9 月	10 月	11 月	12 月
2013	RMSE	5.69	10.53	12.06	13.01	66.62	54.86	58.65	45.23	31.63	7.53	19.58	1.29
	MAE	4.82	8.88	10.08	12.19	64.16	43.15	54.12	34.21	30.15	7.14	19.10	1.29
2014	RMSE	1.56	16.94	41.00	52.52	43.12	44.23	36.32	32.87	41.35	12.11	34.96	2.57
	MAE	1.52	16.74	41.00	51.48	36.45	45.36	25.34	41.23	32.61	25.32	34.79	2.47
2015	RMSE	8.47	12.49	31.12	50.19	66.74	64.16	26.86	56.39	23.33	14.52	15.86	5.93
	MAE	8.35	12.40	13.36	46.20	57.90	62.65	23.75	48.00	28.95	14.53	15.20	5.25

表 5 高海拔样点 2013—2015 年降水插值结果与实测数据的标准差对比

站点	海拔/ m	2013 年 降水/mm	2014 年 降水/mm	2015 年 降水/mm	降水 求和/mm
红河谷	1273	33.46	28.56	20.86	82.88
太洋公路	2329	34.76	25.04	28.36	88.16

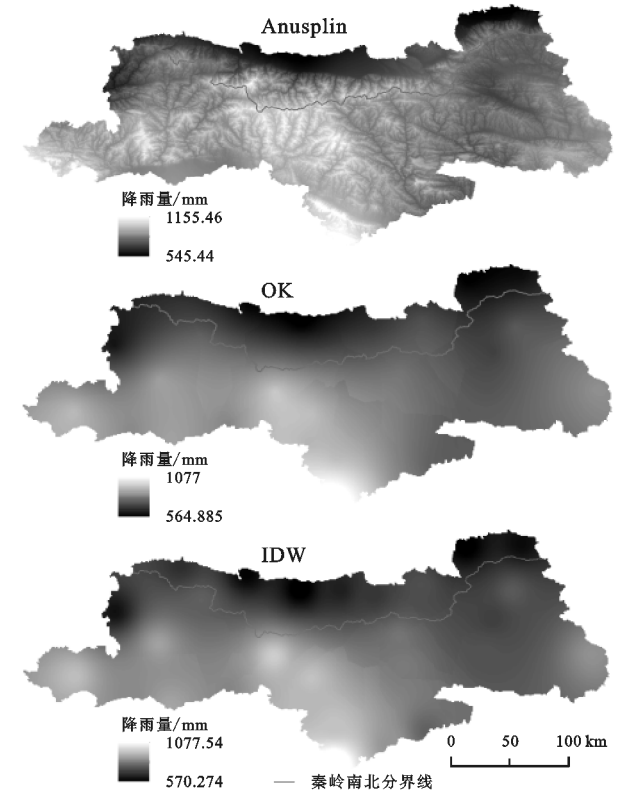


图 4 基于不同插值方法的秦岭地区 57 a 年均降水量的空间分布

1959—2015 年秦岭地区年均降水变化率在 $-3.02\sim 0.83\text{ mm}/10\text{ a}$ 范围内,秦岭地区东部商洛地区变化率最大,达到 $0.83\text{ mm}/10\text{ a}$;降水变化呈上升趋势的地区在秦岭南坡的略阳、石泉和商南等地区,平均海拔分布在 811 m ;降水变化大部分呈下降趋势的地区在秦岭主峰太白山和秦岭南坡安康等地区,平均海拔分布在 $1\,177\text{ m}$ 。春夏秋和冬季变化率分别在 $-0.73\sim 0.65\text{ mm}$, $-2.73\sim 2.50\text{ mm}$, $-2.13\sim 3.69\text{ mm}$ 和 $-0.20\sim 1.02\text{ mm}$,在 57 a 尺度上,增加和降低趋势均未通过显著性检验。

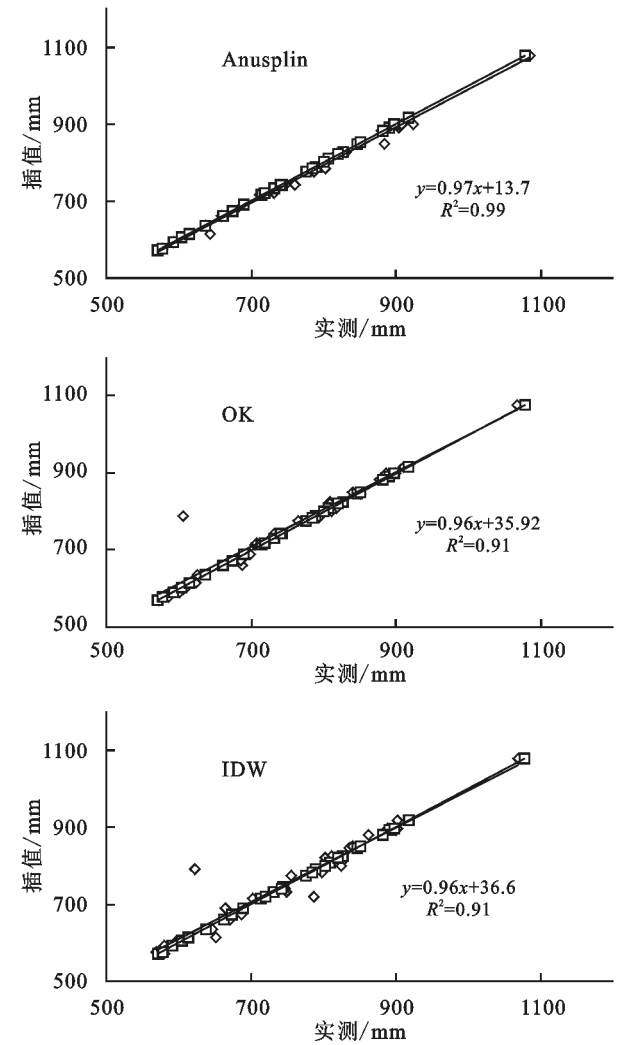


图 5 基于不同插值方法的秦岭地区 57 a 年均降水量实测和插值散点图

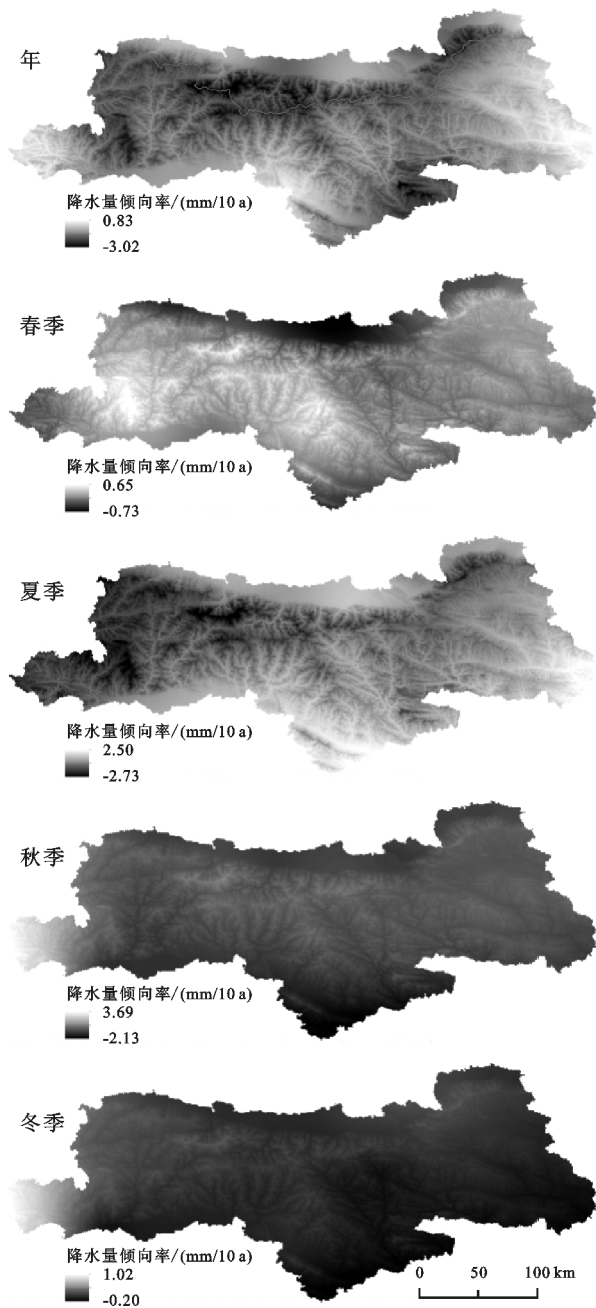


图6 1959—2015年秦岭地区年、季均降水量变化率的空间分布

4 讨论与结论

4.1 讨论

(1) 本文基于 Anusplin 软件得到了秦岭地区 1959—2015 年的月降水栅格信息和年降水栅格信息,为一些径流模型和生态模型提供了数据基础;目前,针对降水插值没有一个完全合适的方法,而澳大利亚气象软件 Anusplin 是一个目前较为适合的方法,但是对于某些高山地区气象因子的插值还存在精度较大的问题,未来的发展方向就是继续寻求一个精度小、融合多因子、适合不同种类地形的插值模型。

(2) 本文的插值方法是基于澳大利亚气象插值

软件 Anusplin,它其中的一个模块需要 DEM 数据,而 DEM 精度的提高也有利于误差的缩小。由前人的研究中可知,前人一般采用 $1\text{ km}\times 1\text{ km}$ 的分辨率,而本文采用 $500\text{ m}\times 500\text{ m}$ 的分辨率,在一定程度上提高了精度,减小了误差,但是如何更进一步提高 DEM 的精度是未来亟待解决的问题。

(3) 而本文进行插值是基于 31 个气象站点,由前人所得结果可知,增加气象站点的数量可提高插值的精度,所以误差存在的一部分原因在于秦岭地区气象站点的有限性;中、高海拔误差普遍较低海拔误差大且不稳定,如何减小误差、改进方法未来还有待提高。

4.2 结论

(1) 获得了数字化降水栅格图。结果表明,近 57 年来,秦岭地区平均年降水的变化范围为 $545.44\sim 1\,155.46\text{ mm}$,空间分布总体呈现南丰北少的态势,其中西南部偏高。秦岭地区年均降水量存在南北差异,南坡 57 a 降水的变化范围为 $601.97\sim 1\,155.46\text{ mm}$,平均降雨量为 847.37 mm ;而北坡降水变化范围为 $545.44\sim 1\,061.84\text{ mm}$,平均降雨量为 737.25 mm ;南坡年均降水多于北坡 110.12 mm ;秦岭山地四季平均降水量大小依次为:夏(403.76 mm)>秋(237.26 mm)>春(169.11 mm)>冬(25.62 mm),且南坡降水大于北坡降水。

(2) 中低海拔样点检验结果表明,处于夏秋季节的误差大于春冬误差;3 年来华阴县降水最为稳定,丹凤县最不稳定;降水误差基本在 20 mm 以内。相比较低海拔样点的误差,高海拔的夏秋季节误差大于春冬误差;降水标准差范围基本在 30 mm 内。基于 Anusplin 方法的实测值与插值结果拟合较好,相关性达 0.99。

(3) 1959—2015 年秦岭地区年均降水变化率的范围为 $-3.02\sim 0.83\text{ mm}/10\text{ a}$ (均未通过显著性检验),高海拔区域降水呈减少趋势,中低海拔地区降水在增加;秦岭地区东部商洛地区变化率最大,达到 $0.83\text{ mm}/10\text{ a}$;降水变化呈上升趋势的地区在秦岭南坡的略阳、石泉和商南等地区,平均海拔分布在 811 m ;降水下降区为秦岭主峰太白山和秦岭南坡安康等地,平均海拔分布在 $1\,177\text{ m}$ 。

参考文献:

- [1] 黄杏元,黄平.GIS 内涵的发展[J].测绘与空间地理信息,2008,31(1):58-59.
- [2] 李莎,舒红,徐正全.利用时空 Kriging 进行气温插值研究[J].武汉大学学报:信息科学版,2012,37(2):237-241.

- [3] 彭彬,周艳莲,高苹,等.气温插值中不同空间插值方法的适用性分析:以江苏省为例[J].地球信息科学学报,2011,13(4):539-548.
- [4] 李新,程国栋,卢玲.青藏高原气温分布的空间插值方法比较[J].高原气象,2003,22(6):565-573.
- [5] 于士凯,姚艳敏,王德营,等.天然牧草生育期平均气温插值方法研究[J].中国农学通报,2012,28(32):35-40.
- [6] 许民,王雁,周兆叶,等.长江流域逐月气温空间插值方法的探讨[J].长江流域资源与环境,2012,21(3):327-334.
- [7] Daly C, Helmer E H, Quiñones M. Mapping the climate of Puerto Rico, Vieques and Culebra[J]. International Journal of Climatology, 2003,23(11):1359-1381.
- [8] Marquínez J, Lastra J, Garcí A P. Estimation models for precipitation in mountainous regions: the use of GIS and multivariate analysis [J]. Journal of Hydrology, 2003,270(1):1-11.
- [9] 石朋,芮孝芳.降雨空间插值方法的比较与改进[J].河海大学学报:自然科学版,2005,33(4):361-365.
- [10] 刘智勇,张鑫,方睿红.基于DEM的榆林市降水空间插值方法分析[J].西北农林科技大学学报:自然科学版,2010,38(7):227-234.
- [11] 庄立伟,王石立.东北地区逐日气象要素的空间插值方法应用研究[J].应用气象学报,2003,14(5):605-615.
- [12] 王江,乐章燕,廖荣伟,等.中国区域温度和降水不同空间插值方法精度对比[J].气象与环境学报,2016,32(6):85-93.
- [13] 谭剑波,李爱农,雷光斌.青藏高原东南缘气象要素Anusplin和Cokriging空间插值对比分析[J].高原气象,2016,35(4):875-886.
- [14] 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.
- [15] 姜晓剑,刘小军,黄芬,等.逐日气象要素空间插值方法的比较[J].应用生态学报,2010,21(3):624-630.
- [16] 刘志红, Tim R. McVicar, Li Lingtao, 等.基于ANUSPLIN的时间序列气象要素空间插值[J].西北农林科技大学学报:自然科学版,2008,36(10):227-234.
- [17] 钱永兰,吕厚荃,张艳红.基于ANUSPLIN软件的逐日气象要素插值方法应用与评估[J].气象与环境学报,2010,26(2):7-15.
- [18] 阎洪.薄板光顺样条插值与中国气候空间模拟[J].地理科学,2004,24(2):163-169.
- [19] 刘金涛,张佳宝.山区降水空间分布的插值分析[J].灌溉排水学报,2006,25(2):34-38.
- [20] 张仁平,张云玲,郭靖,等.新疆地区降水分布的空间插值方法比较[J].草业科学,2018,35(3):521-529.
- [21] 任璇,郑江华,穆晨,等.不同气象插值方法在新疆草地NPP估算中的可靠性评价[J].草业科学,2017,34(3):439-448.
- [22] 单之蔷.南北分界线上的迷雾[J].中国国家地理,2009(10):34-51.
- [23] 刘康,马乃喜,胥艳玲,等.秦岭山地生态环境保护与建设[J].生态学杂志,2004,23(3):157-160.
- [24] 蒋冲,王飞,喻小勇,等.秦岭南北近地面水汽时空变化特征[J].生态学报,2013,33(12):3805-3815.
- [25] 周旗,卞娟娟,郑景云.秦岭南北1951—2009年的气温与热量资源变化[J].地理学报,2011,66(9):1211-1218.
- [26] Hutchinson M F. ANUSPLIN version 4.2 user guide [Z]. Canberra: Australian National University, 2001.
- [27] 刘荣娟,白红英,马新萍,等.太白山保护区气温变化及其空间差异性分析[J].中国农业气象,2016,37(1):1-10.
- [28] 卓静,朱延年.秦岭主脊区年降水量空间插值最优方法研究[J].干旱区地理,2017,40(3):555-563.
- [29] 陈学君,苏仲岳,李仲龙,等.年降水量数据的正态变换方法对比分析[J].干旱气象,2012,30(3):459-464.
- [30] 刘胤汉.陕西秦岭的自然地理特征和改造利用[J].陕西师范大学学报:自然科学版,1974(2):74-83.