

doi:10.3969/j.issn.1000-6362.2013.04.002

王红霞,柳小妮,李纯斌,等. 甘肃省近 42 年降水量变化时空分布格局分析[J]. 中国农业气象,2013,34(4):384-389

## 甘肃省近 42 年降水量变化时空分布格局分析\*

王红霞<sup>1</sup>, 柳小妮<sup>1\*\*</sup>, 李纯斌<sup>1,2</sup>, 任正超<sup>1,3</sup>, 潘冬荣<sup>1</sup>, 魏靖琼<sup>1</sup>

(1. 甘肃农业大学草业学院, 兰州 730070; 2. 甘肃农业大学资源与环境学院, 兰州 730070; 3. 甘肃农业大学经济管理学院, 兰州 730070)

**摘要:**采用反距离加权法(IDW)、普通克里格(OK)、协同克里格(CK)、微地形多元回归+残差分析法(M-AMMRR)和改进的 M-AMMRR 法(I-AMMRR)进行甘肃省 1970-2011 年均降水量、降水趋势的空间插值与交叉验证分析,并进一步分析降水量时空变化。结果表明:(1)在建立气候要素与经纬度、海拔高度等回归关系的同时,考虑坡度和坡向等微地形因子并结合 OK 法进行残差分析的 I-AMMRR 插值方法能够显著提高降水量的模拟精度,最适于干旱半干旱区域。(2)甘肃省近 42a 年均降水量呈东南向西北递减的分布规律,气候带相应地由湿润区过渡为半湿润区、半干旱区至干旱区。其中,干旱区面积最大,占全省面积的 43%。(3)近 42a 来,除祁连山地、河西走廊中东部、北山山地部分地区外,甘肃省年均降水量均呈减少趋势,其中夏季呈减少、冬季呈增加、春秋季降水量变化趋势呈地域性分布。研究结果细化了甘肃省降水资源的分布状况,可为农业结构调整,发展特色农业、精细农业提供依据。

**关键词:**降水量;变化趋势;I-AMMRR 插值法;气候分区

## Spatial-temporal Distribution of Precipitation in Gansu Province Last 42 Years

WANG Hong-xia<sup>1</sup>, LIU Xiao-ni<sup>1</sup>, LI Chun-bin<sup>1,2</sup>, REN Zheng-chao<sup>1,3</sup>, PAN Dong-rong<sup>1</sup>, WEI Jing-qiong<sup>1</sup>

(1. College of Pratacultural Science, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070, China; 2. College of Resource and Environment, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070; 3. College of Economics &amp; Management, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070)

**Abstract:** The basis of meteorological data of annual average precipitation and its trend from 1970 to 2011 in Gansu province was analyzed for spatial interpolation and cross validation, and the spatial-temporal variation of precipitation was analyzed further by using methods of IDW, OK, CK, Micro-topographic Factors and Analytic Method Based on Multiple Regression and Residues (M-AMMRR), improved M-AMMRR (I-AMMRR). The results showed that I-AMMRR, combining with climatic factor, longitude and latitude, altitude and micro terrain factor (slope, aspect) to interpolate based on OK, significantly improved simulation accuracy of precipitation, which was the most suitable interpolation method for arid and semi-arid area. Annual average precipitation had a downward trend from southeast to northwest during last 42 years in Gansu province. Accordingly, the distribution of climatic zone varied from humid region, semi-humid region to semi-arid region and arid region. Meanwhile, the area of arid region was the largest, accounting for 43% of the total area. Apart from Qilian mountain, middle-eastern Hexi corridor and north mountains, annual precipitation in Gansu province decreased during last 42 years. Precipitation in summer showed a decreasing trend while increased in winter. Precipitation variation indicated zonal distribution in spring and autumn. The results detailed the distribution of the precipitation in Gansu province, which could provide the basis for adjustment of agricultural structure, the development of characteristic agriculture and precision agriculture.

**Key words:** Precipitation; Variation trend; I-AMMRR interpolation method; Climatic division

\* 收稿日期:2012-11-23 \*\* 通讯作者。E-mail:liuxn@gsau.edu.cn

基金项目:国家自然科学基金(31160475);草业生态系统教育部重点实验室(甘肃农业大学)开放课题(CYZS-2011014)

作者简介:王红霞(1986-),女,河南宝丰人,硕士生,主要从事草地生态和地理信息系统应用研究。

E-mail:whx417987994@163.com

区域降水量是重要的环境变量,是一个地区气候变化最直接、最敏感的因素<sup>[1-2]</sup>。在全球气候变暖大背景下,西北地区的降水发生了不同程度的变化<sup>[3-5]</sup>。甘肃省属于干旱与半干旱气候,是中国气候变化敏感区、生态环境脆弱区和黄河中上游水土保持重点区<sup>[6]</sup>。随着气候变暖趋势加剧,甘肃省部分地区干旱程度有所加重<sup>[7-8]</sup>。目前,有关甘肃省气候变化方面的研究<sup>[4-5,7-12]</sup>多基于单个或几个气象站点数据进行统计分析或采用传统插值法即反距离加权法(IDW)、普通克里金(OK)、协同克里金(CK)对气象数据进行插值。由于降水的形成和分布是一个复杂的过程,影响降水的因素较多(经纬度、海拔高度、坡度和坡向等),基于单个或几个气象站点数据的统计分析难以准确反映区域尺度的降水特点<sup>[13]</sup>。空间插值技术可将有限的观测站点数据生成区域连续气象数据,使人们能把握整个区域的降水特征,但 IDW、OK 没有考虑地形对降水数据的影响,CK 仅考虑海拔高度对降水的影响<sup>[14]</sup>,模拟结果不能细化甘肃省降水资源的分布状况,而细化的降水资源分布状况图能突显出地域差别,可为农业结构调整、发展特色农业、精细农业提供依据<sup>[15]</sup>。一些学者将海拔高度考虑到地理统计中,利用回归方程,建立降水量与地形变量值如经纬度、海拔高度、坡度、坡向的回归方程,并将其整合到现有的插值模型中,获得较好插值结果<sup>[1-2,14,16-17]</sup>。柳小妮等<sup>[14,16]</sup>提出 AMMRR 模型显著提高了气候数据的模拟精度,模拟结果能较好地反映气象要素的地带性变化。魏靖琼<sup>[17]</sup>在 AMMRR 插值法的基础上,利用坡度、坡向等微地形因子对 AMMRR 法进行修正形成的 M-AMMRR 模型进一步提高了插值精度。但是 AMMRR 和 M-AMMRR 在残差分析过程中,采用计算值易受极值影响的 IDW 法,会产生明显“牛眼”图斑<sup>[18-19]</sup>。相关研究表明,OK 法在气象站点稀少区域的插值效果比 IDW 法好<sup>[20-21]</sup>。王红霞等<sup>[22]</sup>在 AMMRR 基础上,采用 OK 法进行残差面插值模拟甘肃省降水,其结果表明可提高插值精度。

本研究拟在 M-AMMRR 插值法基础上,采用 OK 法进行残差面模拟以改进 M-AMMRR,同时通过多种方法的交叉验证比较,筛选出适于复杂地形条件且站点稀少地区的最优降水量空间插值方法,从而准确获取甘肃省降水量时空分布的精细化信息,并对甘肃省近 42a 降水量时空变化特征进行分析,探讨甘肃省降水量的空间变化特征,以期对自然降水的合理利用、旱情防御、农业结构调整等提供理论依据。

1 资料和方法

甘肃省气象数据来源于中国气象科学数据共享服务网(<http://cdc.cma.gov.cn/home.do>)。甘肃省 1km 分辨率 DEM 数据来源于美国地质调查局(USGS);甘肃省 1:100 万行政区划图来源于地球系统科学数据共享平台(<http://www.geodata.cn>)。甘肃省及周围邻近区域 1970–2011 年记录年代、月份齐全的气象站点共 76 个,在 Excel2007 中建立气象站点 42a 和四季降水量、降水趋势数据库。利用 Arc-Gis9.3 软件将其转化为 Shape File 文件,并分出 80% 训练样本(60 个)和 20% 检验样本(16 个)。

在 M-AMMRR 插值法<sup>[17]</sup>基础上,采用 OK 法进行残差面模拟以改进 M-AMMRR,形成改进型插值模型(I-AMMRR)。采用 I-AMMRR、M-AMMRR、IDW、OK、CK 对甘肃省降水量和降水倾向率进行插值模拟。

采用交叉验证(Cross Validation)对插值结果进行对比分析。运用绝对平均误差(MAE)、相对平均误差(RME)及均方根误差(RMSE),作为评估插值方法效果的标准<sup>[23]</sup>。MRE、MAE、RMSE 值越小,表明插值效果越好。相关性检验在 SPSS17.0 分析工具进行计算。

2 结果与分析

2.1 适于甘肃省降水量的插值方法选择

利用 1970–2011 年的年降水量数据系列计算各站降水量年值及降水量线性变化倾向率,然后分别采用 5 种方法(IDW、OK、CK、M-AMMRR、I-AMMRR)进行插值计算,交叉验证结果见表 1。由表 1 可以看出,

表 1 不同插值模拟结果的交叉检验  
Table 1 Cross validation of different interpolation simulation results

	降水量 Precipitation					降水倾向率 Precipitation trend rate				
	OK	CK	IDW	M-AMMRR	I-MMRR	OK	CK	IDW	M-AMMRR	I-AMMRR
R	0.981	0.981	0.972	0.994	0.996	0.730	0.731	0.599	0.735	0.768
MAE	31.950	31.842	43.53	21.131	15.825	3.958	3.880	4.853	3.630	2.854
MRE	0.137	0.136	0.173	0.099	0.073	1.019	1.017	1.441	0.787	0.769
RMSE	40.811	4.0634	54.12	26.895	22.266	5.185	5.181	6.465	4.977	3.965

5 种方法所得降水量和降水倾向率插值结果与站点实测系列的相关系数(R)有一定差异,其大小顺序为:I-AMMRR > M-AMMRR > CK 和 OK > IDW,相应的 MAE、MRE、RMSE 排序均为 IDW > OK > CK > M-AMMRR > I-AMMRR,表明考虑经纬度、海拔高度、坡度和坡向的 M-AMMRR 和 I-AMMRR 具有较好的插值效果,优于传统插值方法(OK、CK、IDW)。其中,尤以 I-AMMRR 的相关系数最高,MAE、MRE、RMSE 最低,表现出明显优势,因而选取 I-AMMRR 法模拟降水量和降水倾向率的空间分布。

2.2 甘肃降水量的时空变化特征分析

2.2.1 年降水量和气候区分布

由图 1a 可见,甘肃近 42a 年均降水量空间变异性大,从东南地区陇南南部的康县、徽县、文县、武都部分地区到西北地区的河西走廊西端金塔、玉门、安西、敦煌,北山山地,降水量由 800mm 以上减少至 100mm 以下;从西部 400~500mm 的祁连山脉向东部的沙漠戈壁逐渐减少至 100mm 以下。河西走廊、祁连山地、甘南高原降水量随海拔高度的增加而增加,陇南山地、陇东黄土高原随海拔高度的增加而减少。

根据中国气候的分区划分标准,多年年均降水量河西走廊大部地区、祁连山地西段部分地区和北山山地 <200mm,为干旱区。该地区降水量少,气象灾害危害严重,是气候变化敏感区、生态环境脆弱区。以兰州—榆中—定西—会宁—环县地区为界,以北的黄

土高原、祁连山地大部分地区、河西走廊中西部 200~400mm,为半干旱区,该区亦是气候变化敏感区、生态环境脆弱区。400~800mm 的地区主要分布在兰州—榆中—定西—会宁—环县以南至陇南南部的康县、徽县、文县、武都,为半湿润区。陇南南部的康县、徽县、文县、武都部分地区在 800mm 以上,为湿润区。根据在 ArcGis9.3 中的计算(表 2),甘肃省干旱、半干旱区面积占全省总面积的 62.60%,其中干旱区面积最大,达到  $1.73 \times 10^5 \text{ km}^2$ , 占全省面积的 42.92%。

表 2 甘肃省各气候区面积

Table 2 The area of different climatic regions in Gansu province

气候区 Climatic region	面积 Area (km <sup>2</sup> )	占全省比例 Percentage(%)
干旱区(<200mm) Arid area	173477.00	42.92
半干旱区(200~400mm) Semi-arid area	79521.40	19.68
半湿润区(400~800mm) Semi-humid area	145593.00	36.02
湿润区(>800mm) Humid area	5555.07	1.37

图 1b 表明,甘肃省 42a 线性倾向率自东南到西北呈现负—正—负的规律,亦具有明显的空间差异性,整体表现为祁连山地、河西走廊中东部、北山山地部分地区呈上升趋势,其中永昌地区增加显著,线性倾向率为  $10.90 \text{ mm} \cdot 10 \text{ a}^{-1}$ 。河西走廊西段、陇中和陇东黄土高原、甘南高原、陇南山地呈减少趋势,其中马鬃山、临洮、兰州 3 个气象站点减少趋势显著( $P < 0.05$ ),其中临洮变化最大,为  $-26.80 \text{ mm} \cdot 10 \text{ a}^{-1}$ ,其次是兰州,为  $-19.40 \text{ mm} \cdot 10 \text{ a}^{-1}$ 。

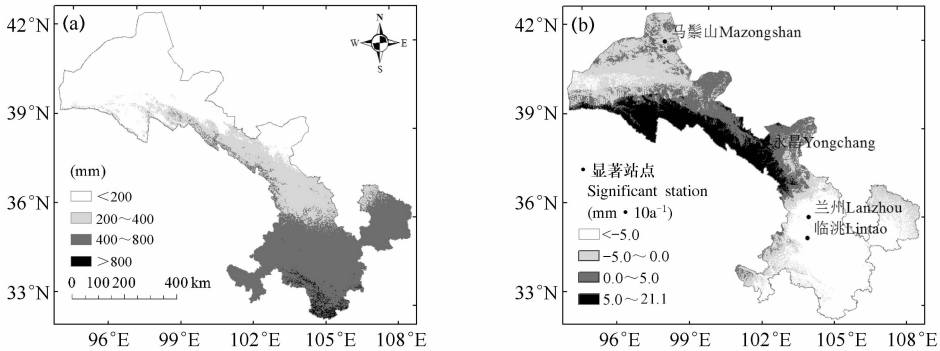


图 1 甘肃省 1970-2011 年年降水量(a)和降水倾向率(b)分布(I-AMMRR 法插值结果)

Fig. 1 Distribution of annual precipitation (a) and its tendency rate (b) from 1970 to 2011 in Gansu province(I-AMMRR results)

2.2.2 降水量和气候区的年代际变化

利用 I-AMMRR 插值法得到 20 世纪 70、80、90 年代以及 21 世纪前 10a 甘肃省降水量的空间分布见图 2。由图可见,70 年代敦煌市—酒泉市—张掖市—民勤县以北降水量 <200mm,为干旱区。敦煌市—酒泉市—张掖市—民勤县以南至永登县西部—皋兰县南部—会宁县—环县北部降水量为 200~400mm,为半干旱区,永登县西部—皋兰县南部—会宁县—环县北

部以南至迭部县—文县—康县南部一带降水量为 400~800mm,为半湿润区。迭部县—文县—康县南部一带降水量 >800mm,为湿润区;80 年代降水减少,干旱区、半干旱区范围均向南扩张,面积增大。半湿润区、湿润区面积缩小,其中湿润区缩至文县中南部—武都县南部—康县南部。90 年代降水增多,气候区界限均向北偏移,干旱区面积减小;半干旱区面积较 80 年代有所减少而较 70 年代增加,半湿润区面积增大,湿

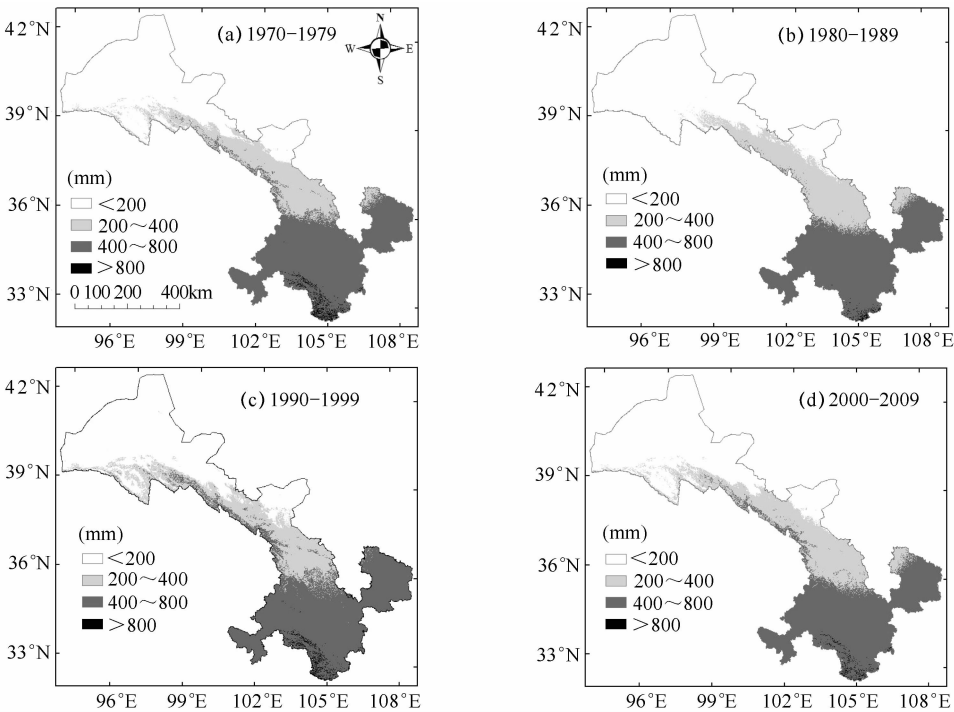


图 2 甘肃省各年代年均降水量分布 (mm)

Fig. 2 Distribution of annual average precipitation in the latest four decades

润区向陇南山地的武都西北部—舟曲县—迭部县偏移,面积较 80 年代增加;21 世纪前 10a,气候区界限均向南偏移,干旱区面积较 90 年代有所增加而较 70 年代减少,半干旱区面积增加,湿润区、半湿润区面积减小。

由表 3 可知,甘肃省 80 年代干旱区面积最大,为  $1.83 \times 10^5 \text{ km}^2$ , 占总面积的 45.27%, 显著高于 90 年代 ( $P < 0.05$ ), 较 70 年代和 21 世纪前 10a 分别高

5.04% 和 7.70%;21 世纪前 10a 半干旱区面积最大,而 70 年代最小,二者相差 14.50%,80 与 90 年代面积差异不显著;90 年代半湿润区面积最大,与 70 年代和 21 世纪前 10a 之间差异不显著,80 年代面积最小,为  $1.4 \times 10^5 \text{ km}^2$ ;70 年代湿润区面积最大,显著高于 80、90 年代和 21 世纪前 10a ( $P < 0.05$ ),80 年代面积最小,较 90 年代和 21 世纪前 10a 分别减少 69.32% 和 41.75%。

表 3 甘肃省各年代各气候区面积

Table 3 The area of different climatic regions in Gansu province ( $\text{km}^2$ )

气候区 Climatic regions	1970 – 1979	1980 – 1989	1990 – 1999	2000 – 2009
干旱区 Arid area	174170.29ab	182949.32a	163517.36b	169870.47ab
半干旱区 Semi-arid area	75339.60b	80549.31ab	78363.14ab	86261.50a
半湿润区 Semi-humid area	150114.64ab	139514.70b	158572.44a	146069.11ab
湿润区 Humid area	4521.94a	1133.14d	3693.53b	1945.39c

注:同行中不同小写字母表示差异显著 ( $P < 0.05$ )。

Note: Different letters in the same line indicate significant differences ( $P < 0.05$ )。

2.2.3 季节降水量变化空间分布

由图 3a 可知,春季降水量变化具有明显的空间差异,线性倾向率自东南到西北呈由负转到正的变化规律。就区域而言,祁连山地、河西走廊大部地区、北山山地、甘南高原大部地区年降水量呈上升趋势,其中武威、永昌地区降水增加趋势显著,线性倾向率分别为  $3.10$ 、 $4.50 \text{ mm} \cdot 10 \text{ a}^{-1}$ 。陇中和陇东黄土高原、陇

南山地降水呈减少趋势,但减少趋势不显著。

图 3b 表明,夏季的降水量线性倾向率为负值(除祁连山地西部、陇东黄土高原南部),其减少幅度从东南至西北基本呈由高向低的走势,马鬃山、敦煌、安西、玉门镇 4 个气象站点降水量下降趋势显著 ( $P < 0.05$ ),其中马鬃山地区达到极显著 ( $P < 0.01$ ),其线性倾向率分别为  $-8.50$ 、 $-5.50$ 、 $-5.50$ 、 $-5.10 \text{ mm} \cdot 10 \text{ a}^{-1}$ 。

由图 3c 可看出,秋季降水线性倾向率自东南到西北呈现由负到正的规律,陇南山地、甘南高原、陇中黄土高原大部地区、陇东黄土高原南部地区年降水量呈下降趋势,河西走廊、北山山地、祁连山地呈增加趋势,但变化趋势均不显著。

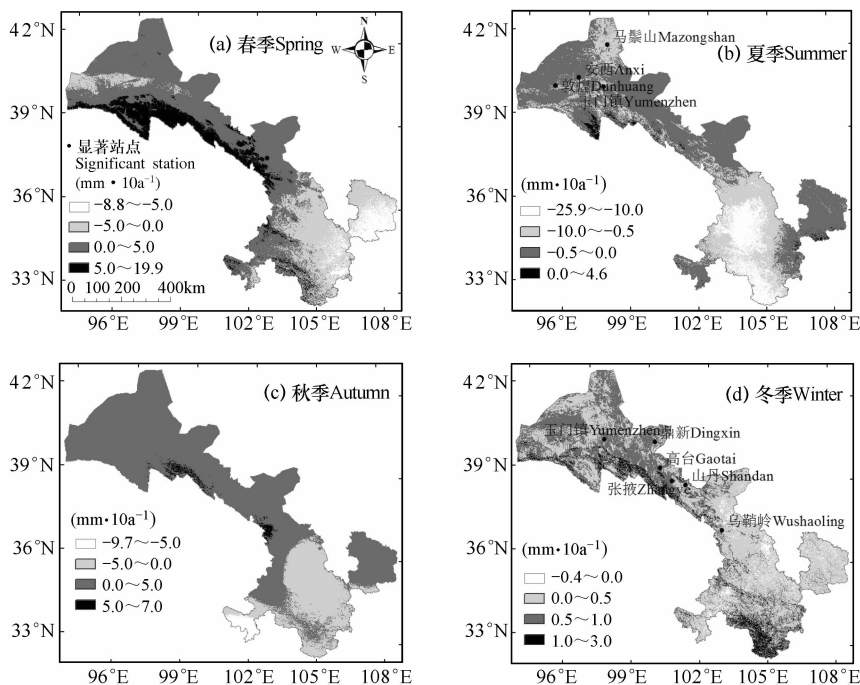


图 3 甘肃省 1970—2011 年季节降水量变化倾向率

Fig. 3 Climate tendency rate of seasonal precipitation in Gansu province from 1970 to 2011

### 3 结论与讨论

对甘肃 76 个气象站点 42a 降水量资料的插值比较结果表明,在建立气候要素与经纬度、海拔高度等之间回归关系的同时,若利用考虑坡度和坡向等微地形因子并结合 OK 法进行残差分析的插值方法即 I-AMMRR 插值方法,可显著提高降水量的模拟精度,说明该方法较适合干旱半干旱区域应用。闫业庆等认为,影响降水的主要因素是海拔高度和地形<sup>[11,15]</sup>,王智等研究也表明,利用降水数据进行空间插值时引入经纬度、海拔高度、坡度和坡向等因子,将会提高气象数据的插值精度<sup>[2,24-25]</sup>,这与本文结论一致。

从近 42a 的平均值看,甘肃省年降水量自东南向西北递减,气候相应地由湿润区过渡为半湿润区、半干旱区至干旱区。其西北地区为干旱区,降水量稀少,达不到农作物正常生长所需水分条件,而陇南地区属半湿润区、湿润区,降水量丰富,但由于没有得到较好的利用,每年均会出现因暴雨而产生的地质灾害现象。因而可通过在甘肃省内部实施如南水北调小工程等<sup>[11]</sup>,提高甘肃省的经济效益和生态效益。

从甘肃省 20 世纪 70、80、90 年代以及 21 世纪前

图 3d 显示,冬季线性倾向率基本为正值,其中玉门镇、鼎新、高台、张掖、山丹、乌鞘岭 6 个气象站点增加趋势显著,线性倾向率分别为 1.30、0.70、1.90、1.00、1.00、1.60mm·10a<sup>-1</sup>,而高台、张掖、乌鞘岭 3 个地区降水量减少的趋势极显著( $P < 0.01$ )。

10a 4 个年代降水量看,80 年代降水较少,400mm 降水量分界线向南扩张,干旱区、半干旱区总面积扩至最大,90 年代降水较多,400mm 降水量分界线向北偏移,干旱区、半干旱区总缩至最小。21 世纪前 10a 降水量减少,降水量 400mm 分界线向南扩张,干旱区、半干旱区总面积增大。年降水量 400mm 分界线是农牧业和林业的分界线,≤400mm 以牧业为主,>400mm 以农业为主,可以发展林业<sup>[26]</sup>,因而可根据甘肃省降水变化规律,合理指导该区农业、林业、畜牧业的生产。

近 42a 来甘肃省年均降水量呈下降趋势,祁连山地、河西走廊中东部、北山山地部分地区年降水量呈上升趋势;夏季降水量呈减少趋势,冬季降水量呈增加趋势,与武金慧等<sup>[10]</sup>对甘肃省 1957—2006 年降水量及气候变化趋势研究结果相近。本研究表明,春季降水量(除黄土高原、陇南山地)呈增加趋势;秋季除陇南山地、甘南高原、陇中黄土高原大部地区、陇东黄土高原西南部地区外年降水量呈增加趋势,与武金慧等的研究结果不一致。这种差异可能来源于本研究采用 I-AMMRR 插值法模拟甘肃省降水趋势的空间分

布进行分析,而武金慧等则通过气象台站的资料进行分析。

甘肃省马鬃山、敦煌、安西、玉门镇等地区夏季降水量下降趋势显著。全省近几十年来平均气温呈增加趋势<sup>[4,7,27]</sup>,而夏季全省、春秋季节部分地区降水量存在下降趋势,气候呈现暖干化倾向。侯琼等<sup>[28]</sup>研究表明,小麦和谷物对降水量敏感,春、夏季降水量的减少将导致作物减产,蒋菊芳等<sup>[29]</sup>研究也表明,夏、秋季降水量与一年生植物乳熟期、成熟期和多年生植物开花期、落叶期具有显著正相关关系。因而根据甘肃省不同地区、不同季节的降水情况,因地制宜采用人工干预措施,可提高作物和牧草产量。

本文采用 I-AMMRR 替代传统的空间插值法(IDW、OK、CK)模拟近42a年均降水量、降水趋势的空间分布,获得了具有较高精度的年均降水量、降水趋势数据集,但由于甘肃省面积广阔,地形复杂,可获得的气象观测站点较少,在站点稀疏区域增加模拟站点以提高高原观测数据的空间信息量等有待进一步研究。

## 参考文献:

[1] 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.

[2] 王智,吴友均,梁凤超,等. 新疆地区年降水量的空间插值方法研究[J]. 中国农业气象,2011,32(3):331-337.

[3] 江俊杰,孙卫国. 1959-2007年安徽省降水时空变化特征分析[J]. 中国农业气象,2012,33(1):27-33.

[4] 任朝霞,杨达源. 西北干旱区近50年气候变化特征与趋势[J]. 地球科学与环境学报,2007,29(1):99-102.

[5] 陈豫英,冯建民,陈楠,等. 西北地区东部可利用降水的时空变化特征[J]. 干旱区地理,2012,35(1):56-66.

[6] 郑度,杨勤业,吴绍洪,等. 中国生态地理区域系统研究[M]. 北京:商务印书馆,2008:34.

[7] 姚玉璧,肖国举,王润元,等. 近50年来西北半干旱区气候变化特征[J]. 干旱区地理,2009,32(2):159-165.

[8] 王燕,王润元,王毅荣,等. 近37年甘肃省降水特征分析[J]. 干旱区资源与环境,2009,23(4):94-99.

[9] 林纾,陆登荣. 近40年来甘肃省降水的变化特征[J]. 高原气象,2004,23(6):898-904.

[10] 武金慧,李占斌,沈中原. 甘肃省近50年降水量及气候变化趋势研究[J]. 干旱区资源与环境,2008,22(11):24-29.

[11] 闫业庆,胡雅杰. 甘肃省降水量时空分布特征浅析[J]. 甘肃科技,2011,27(1):63-66.

[12] 杨东,程军奇,李小亚,等. 甘肃黄土高原各级降水和极端降水时空分布特征[J]. 生态环境学报,2012,21(9):1539-1547.

[13] 陈晶晶,胡蓓蓓,王军,等. 天津降水数据的空间插值分析[J]. 安徽师范大学学报(自然科学版),2010,33(4):382-387.

[14] 柳小妮,郭婧,任正超,等. 基于气象要素空间分布模拟优化的中国草地综合顺序分类[J]. 农业工程学报,2012,28(9):222-229.

[15] 张旭东,辛吉武,王润元,等. 基于DEM的甘肃省降水资源分析[J]. 干旱地区农业研究,2009,27(5):1-5.

[16] 郭婧,柳小妮,任正超. 基于GIS模块的气象数据空间插值方法新改进:以甘肃省为例[J]. 草原与草坪,2011,31(4):41-50.

[17] 魏琼琼. 甘肃省草地NPP的模拟估算及影响因素研究[D]. 兰州:甘肃农业大学,2012:12-23.

[18] 孟庆香,刘国彬,杨勤科. 基于GIS的黄土高原气象要素空间插值方法[J]. 水土保持研究,2010,17(1):10-14.

[19] 郑小波,罗宇翔,于飞,等. 西南复杂山地农业气候要素空间插值方法比较[J]. 中国农业气象,2008,29(4):458-462.

[20] 刘胤雯,赖格英,陈元增,等. 梅江河流域年均降雨量空间插值方法研究[J]. 亚热带资源与环境学报,2007,2(3):29-34.

[21] 魏智,金会军,蓝永超,等. 基于Kriging插值的黑河分水后中游地下水资源变化[J]. 干旱区地理,2009,32(2):196-203.

[22] 王红霞,柳小妮,任正超,等. 降水量的空间插值方法研究:以甘肃省为例[J]. 草原与草坪,2012,32(5):12-16.

[23] 刘登伟,封志明,杨艳昭. 海河流域降水空间插值方法的选取[J]. 地球信息科学,2006,8(4):75-83.

[24] 陆忠艳,李长青,袁子鹏,等. 基于GIS的辽宁气温和降水空间扩展方法[J]. 中国农业气象,2008,29(1):90-93.

[25] 马轩龙,李文娟,陈全功. 基于GIS与草原综合顺序分类法对内蒙古草地类型的划分初探[J]. 草业科学,2009,26(5):7-13.

[26] 李元华,车少静. 河北省温度和降水变化对农业的影响[J]. 中国农业气象,2005,26(4):224-228.

[27] 陈少勇,郭江勇,郭忠祥,等. 中国西北干旱半干旱区年平均气温的时空变化规律分析[J]. 干旱区地理,2009,32(3):365-372.

[28] 侯琼,李杨,包松林. 内蒙古东部区粮食产量对气候变化的响应[J]. 中国农业气象,2011,32(增1):113-117.

[29] 蒋菊芳,王鹤龄,魏育国,等. 河西走廊东部不同植物类型物候对气候变化的响应[J]. 中国农业气象,2011,32(2):543-549.