

基于宏观地理因子估算黄土高原地区 降水资源空间分布

沈红¹, 刘文兆^{1,2}

(1. 西北农林科技大学资源环境学院, 陕西 杨凌 712100; 2. 中国科学院水利部水土保持研究所,
黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 陕西 杨凌 712100)

摘要: 基于经度、纬度和海拔高度3种宏观地理要素信息, 采用“逐步回归的趋势面模拟+残差内插”法, 建立黄土高原地区降水量空间分布的回归模型, 并根据模型估算结果分析该区降水资源的空间分布特征。回归模型的显著性检验及站点检验表明: 经度、纬度和海拔高度3种宏观地理因子对黄土高原地区降水量的空间分布具有很强的决定作用; 基于3种宏观地理因子建立的降水模型可用于模拟黄土高原地区年降水量的空间分布。根据模型的估算结果, 可知黄土高原地区年均降水量的空间分布差异显著, 呈现出由东南向西北方向递减的趋势, 半干旱~半湿润气候类型占全区总面积的85%以上, 降水量集中在250~800 mm之间。

关键词: 宏观地理因子; 降水; 黄土高原; 空间化

中图分类号: P426.61*3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-7601(2011)01-0237-05

黄土高原地区位于我国西北内陆, 地跨山西、陕西、宁夏、甘肃4省的大部分地区以及青海、河南两省的小部分区域, 总面积达60多万平方公里。该区位于黄河中游流域, 地形地势差异显著, 气候类型复杂多样, 降水主要受东南季风的影响, 处于季风活动的边沿地区。黄土高原地区, 气候干燥, 降水变率大, 植被缺乏, 水土流失现象极为严重, 高原西部和北部临近大陆干旱气候区, 受到沙漠化的严重威胁。在气候变化以及人类活动的共同作用下, 该区已成为气候变化的敏感区、生态环境的脆弱带^[1-3]。

弄清降水资源空间变化的特征, 对区域工农业生产及生态建设具有重要指导意义。目前, 不少学者针对黄土高原地区的降水资源开展了相关研究^[4-8], 但所用空间化方法却多以直接插值为主, 即运用不同插值软件(如Surfer、ArcGIS、ANUSPLIN等)或不同插值方法(IDW、Kriging、Spline等)对区域气象站点的降水资料直接进行空间内插。插值方法虽简单易行, 但对地理环境要素的影响考虑不足。

本研究采用“逐步回归的趋势面模拟+残差内插”法, 模拟黄土高原地区降水资源的空间分布特征, 该方法在甘肃省降水资源分析中曾被应用^[9]。所建趋势面模型不但可以反映出宏观地理因子(经度、纬度和海拔高度)对研究区降水要素的制约, 还

能一定程度上消减由于站点分布不均对模拟精度的影响, 而逐步回归法的引入则对趋势面模型所涉及的各项因子进行逐一检验和筛选, 提高了模型的回归精度。本研究以期能为区域降水要素的空间化研究提供有效方法, 服务于黄土高原地区农业生产与生态建设。

1 资料与方法

1.1 数据来源

本文以黄土高原为研究区域, 选取黄土高原及周边地区135个气象站1971~2000年的实测月均降水数据。考虑到插值过程中的边缘误差效应, 因此在选择站点时, 其覆盖面积要略大于黄土高原的实际范围。对于时间序列长度不足25 a的台站, 将其作为检验站点。图1即为站点的总体分布, 其中实心圆点表示参与空间化的127个气象台站, 8个检验站点以空心十字表示。所有台站的气象资料均来自中国气象科学数据共享服务网(<http://cdc.cma.gov.cn>)。黄土高原地区数字高程数据(Digital Elevation Model, DEM)由国际农业研究磋商组织-空间信息联合会网站(csi.cgiar.org)提供, 空间分辨率为90 m。

收稿日期: 2010-04-09

基金项目: 中国科学院知识创新工程重要方向项目(KZCX2-YW-424); 黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室专项(10502-Z10)

作者简介: 沈红(1983—), 女, 广西柳州人, 硕士, 主要从事区域气候变化及其影响效应评估。E-mail: shenhong1119@126.com。

通讯作者: 刘文兆(1960—), 男, 陕西乾县人, 研究员, 博士生导师, 从事节水农业与水文生态研究。E-mail: wzliu@ms.iswc.ac.cn。



图 1 黄土高原及周边气象站点的分布

Fig.1 Spatial distribution of meteorological stations over the Loess Plateau

1.2 方法介绍

经度、纬度和海拔高度是影响地区降水要素空间分布的重要地理因素^[10-12]。本文采用“逐步回归的趋势面模拟+残差内插”法,基于经度、纬度和海拔高度 3 种宏观地理要素信息建立其与黄土高原地区多年月均降水量的回归模型。该方法将区域降水要素的空间分布分解为趋势面部分和残差部分:趋势面部分反映的是区域内受大范围宏观地理因子(经度、纬度和海拔高度)控制的规律性降水量;残差部分则反映的是局部小地形因子以及其他环境因素对空间降水造成的扰动^[12,13]。用数学方程表示为:

$$P = f(\varphi, \lambda, h) + \varepsilon \quad (1)$$

式中, P 表示某地降水量的估算值; $f(\varphi, \lambda, h)$ 表示受经度(λ)、纬度(φ)和海拔高度(h)控制的趋势面部分的降水; ε 为残差值。

1.2.1 逐步回归的趋势面模型的建立 依据趋势面公式(2),将研究区 127 个气象站点 1971 ~ 2000 年的实测月平均降水量作为因变量,将站点对应的经度、纬度和海拔高度作为自变量,建立两者间的回归关系。

$$f(\varphi, \lambda, h) = b_0 + b_1\varphi + b_2\lambda + b_3h + b_4\varphi^2 + b_5\lambda^2 + b_6h^2 + b_7\varphi\lambda + b_8\varphi h + b_9\lambda h \quad (2)$$

式中: f 表示残差订正前的某地月平均降水量; λ 、 φ 和 h 分别代表该地的地理经度、纬度和海拔高度; b_0 为常数项, $b_1 \sim b_9$ 为各项待定系数;方程的最高项次设定为二次。

建模过程中,为了提高回归精度,获得最佳回归模型,采用逐步回归法分别对 12 个月的趋势面模型进行逐步回归分析,计算自变量 x_i 对因变量 $f(x)$ 的贡献大小,在不影响模型显著性的前提下,剔除原模

型中对降水量空间分布影响不显著的自变量,重新建立回归方程。然后再将 DEM 所携带的经、纬度信息作为独立图层提取出来,与 DEM 一块带入回归方程进行代数迭加计算,所获结果为残差修正前的 12 个月的月平均降水量空间分布,用图层 ① 表示。

1.2.2 残差订正 利用 ArcGIS 9.2 的地统计模块提供的反距离权重法(IDW)对各月的站点残差序列分别进行空间内插,获得栅格图层②。内插过程中,插值参数的设置遵循在交叉验证(Cross Validation)中获得的均方根误差(RMSE)最小的原则,并调整所获栅格图像的空间分辨率,使之与 DEM 的保持一致。

最后,将栅格图层①②进行迭加,所得结果即为黄土高原地区多年月平均降水量的空间分布图,年均降水量空间分布图的生成则是通过对月图层进行累加得到。

1.2.3 站点检验 为了评估模型估算的精度,本文选取研究区内会宁、杭锦后旗、伊金霍洛旗、中卫、长治、晋东南、定边和洛阳 8 个气象站点的实测多年年均降水量与模拟结果进行对照,检验结果主要通过绝对误差、相对误差和相关系数 3 个统计参数来反映。

2 结果与分析

2.1 逐步回归的趋势面模型的显著性检验

如表 1 所示,通过对趋势面模型进行逐步回归分析,模型的自变量个数得到了精简,并且新建的 12 个回归模型均通过了置信水平 $\alpha = 0.01$ 的极显著性检验。复相关系数 R 可以反映因变量 $f(x)$ 与自变量 x 之间的相关程度,而决定系数 R^2 则反映 x 对 $f(x)$ 变异的决定性强弱。12 个回归模型中, R 和 R^2 值分别介于 0.830 ~ 0.958 和 0.689 ~ 0.918(见表 1),据此可以判定:研究区降水量的空间变化与经度、纬度以及海拔高度 3 种宏观地理因子之间存在着很强的相关性,模型的回归效果较为理想;除 7、8 月的值略微偏低外,其他各月的值均大于 0.8,说明 3 种宏观地理因子基本决定了研究区 80% 以上的降水空间变异,决定作用很强。

2.2 残差订正前后的误差分析

趋势面模型建立后,还需对模型产生的残差值进行空间内插,用于订正模拟曲面,这里比较了黄土高原内部 58 个气象站点在残差订正前后的相对误差分布。如表 2 所示,与站点实测多年平均降水量相比,残差订正前的估算值的相对误差在 30% 以内均有分布,最大相对误差为 61.6%(景泰),最小值

为 0.2%(民和),而在残差订正之后,模拟值与实测值之间的相对误差均降至 5% 以下,最大值为 2.3%(华山),最小值仅为 0.0001%(天水),说明使用残差内插订正的方法可以降低趋势面模型产生的误差,有利于提高研究区年均降水量的估算精度。

表 1 各月平均降水量回归模型的显著性检验

Table 1 Tests of significance for the established regression functions

月份 Month	入选的参数 X_i 的个数 Number of selected variables	显著性值 F	复相关系数 R	决定系数 R^2
1	6	127.476	0.930	0.864
2	5	147.958	0.927	0.859
3	6	222.460	0.958	0.918
4	3	313.158	0.940	0.884
5	5	267.235	0.958	0.917
6	4	167.372	0.920	0.846
7	5	89.856	0.888	0.788
8	3	90.871	0.830	0.689
9	4	151.737	0.912	0.833
10	3	224.791	0.920	0.846
11	7	151.732	0.948	0.899
12	8	126.319	0.946	0.895

表 2 各站点实测多年年均降水量与模拟值之间的误差分布

Table 2 Distribution of the errors calculated from the simulated and measured annual precipitation

误差分类 Category of errors	5%	5% ~ 10%	10% ~ 20%	20% ~ 30%	> 30%	合计 Total
残差订正前 Before residual rectifying	58	0	0	0	0	58
残差订正后 After residual rectifying	100	0	0	0	0	100

2.3 站点检验结果

相较于 8 个检验站点的实测年均降水总量而言(见表 3),除对中卫一站的模拟效果欠佳外,其余检验站点的年均降水量模拟值均较接近于实测值,相关系数均达到 97% 以上,绝对误差介于 5.02 ~ 35.17 mm,相对误差介于 1.2% ~ 13.4%。该结果表明“逐步回归的趋势面模拟 + IDW 内插”法能够基本反映出不同站点地区年均降水量的空间分布差异,基于经度、纬度及海拔高度 3 种宏观地理因子建立

的降水模型可以用于整个黄土高原地区年均降水量的估算。

表 3 站点检验的参数统计

Table 3 Statistical parameters for station validation

检验站点 Station	统计参数 Statistical parameters		
	相关系数 Correlative coefficient	绝对误差 (mm) Absolute error	相对误差 (%) Relative error
会宁 Huining	0.999	5.07	1.2
杭锦后旗 Hangjinhouqi	0.983	5.02	3.9
伊金霍洛旗 Yijinhuoluqi	0.986	20.69	6.0
中卫 Zhongwei	0.974	23.81	13.4
洛阳 Luoyang	0.998	35.17	5.8
长治 Changzhi	0.986	28.53	5.3
晋东南 Jindongnan	0.994	25.95	4.5
定边 Dingbian	0.984	13.31	4.2

2.4 黄土高原地区降水空间分布特征

图 2 为采用“逐步回归的趋势面模拟 + IDW 内插”生成的黄土高原地区年均降水量空间分布图,如图所示:黄土高原地区降水量的空间差异非常显著,从 200 mm 以下到 800 mm 以上均有分布,呈现出由东南向西北逐级递减的趋势。区内降水最高值出现在秦岭山地,年均降水量超过 800 mm,这与其海拔相对较高有一定关系(在一定高程范围内,降水量随海拔高度的升高而增加);山西东部、南部以及北部五台山区,陕西中部,甘肃中、东部偏南地区,年降水量约为 500 ~ 700 mm;山西北部及其中西部地区,陕西北部,甘肃中部,宁夏大部分地区,属于黄土高原的少雨区,年降水量约为 200 ~ 400 mm;研究区内,年降水量最小值位于内蒙古河套地区到宁夏银川一线,年降水量不足 200 mm。

将年均降水量作为气候分区的评判指标^[1],可将黄土高原划分为干旱区、半干旱区、半湿润区和湿润区 4 种气候类型,分别占研究区总面积的 11.30%, 57.32%, 31.29% 和 0.09%(参见表 4)。其中,半干旱和半湿润气候区分布的面积最广,占总面积的 85% 以上,可见半干旱半湿润的气候类型为黄土高原的主导气候类型。黄土高原的 4 类气候分区中,半干旱气候区是受自然灾害(如旱灾、霜冻、风沙灾害等)影响最严重的区域,也是水土流失的高发区,在开展水土保持、生态治理的过程中应优先考虑该区^[14]。

降水量的空间分布的分析以及半湿润区与半干旱区的划分对于指导农业生产和生态建设很有意

义。有学者将 400~500 mm 等降水线作为半湿润区与半干旱区的分界^[6,15](参考图 2),该线以北适于

牧业生产,坡地退耕宜以还草为主,以南则适于农业生产,坡地退耕以还林为主。

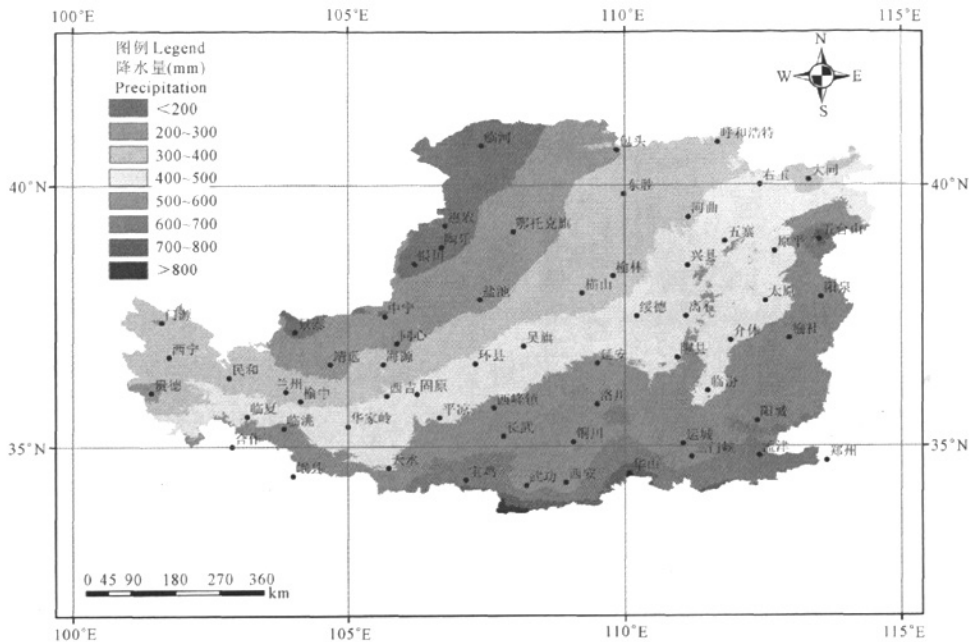


图 2 基于“逐步回归的趋势面模拟 + IDW 内插”法获得的黄土高原年降水量空间分布图
Fig.2 Spatial distribution of annual precipitation over the Loess Plateau based on “stepwise”

表 4 黄土高原地区气候类型的面积统计
Table 4 Statistics for four different climate types over the Loess Plateau

分区 Subarea	面积(km ²) Area	所占百分比(%) Percentage
干旱区($p < 250$ mm) Arid areas	58044	11.30
半干旱区($250 < p < 500$ mm) Semi-arid areas	294360	57.32
半湿润区($500 < p < 800$ mm) Semi-humid areas	160670	31.29
湿润区($p > 800$ mm) Humid areas	447	0.09

3 结论与讨论

本研究表明,经度、纬度和海拔高度 3 种宏观地理因子对黄土高原地区降水量的空间分布具有很强的决定作用,在宏观地理因子以及局部小地形因子的共同影响下,黄土高原地区年均降水量的空间分布差异较为显著,呈现出由东南向西北递减的趋势,全区主要以半干旱—半湿润气候类型为主,占全区总面积的 85% 以上。

将宏观地理因子与降水要素相结合,采用“逐步

回归的趋势面模拟 + 残差内插”法建立黄土高原地区降水空间分布的数学模型,能基本反映出不同地区年均降水量的分布差异,可以用于模拟整个黄土高原降水量的空间分布,这不仅为区内无测站分布区的降水量估算提供参考,还可为全区农业结构调整以及水土保持工作提供科学依据。

另外,还需指出的是,影响地区降水变化的因素非常多,这使得目前欲对降水量的时空分布进行精确地模拟和预测存在一定难度。本文仅从宏观地理因子出发,探讨了降水要素空间化的可行性,欲进一步优化模型或探求更加理想的方法来表征区域降水变化的各种因子,并对其进行合理量化或参数化。

参考文献:

[1] 钱林清. 黄土高原气候[M]. 北京:气象出版社,1991:1—369.
[2] 王薇棠,刘文泉. 黄土高原农业生产气候脆弱性的初步研究[J]. 灾害学,2003,18(3):34—39.
[3] 姚玉璧,王毅棠,李耀辉,等. 中国黄土高原气候暖干化及其对生态环境的影响[J]. 资源科学,2005,27(5):146—152.
[4] 田凤霞,赵传燕,冯兆东. 黄土高原地区降水的空间分布[J]. 兰州大学学报(自然科学版),2009,45(5):1—5.

- [5] 卢爱刚. 半个世纪以来黄土高原降水的时空变化[J]. 生态环境学报, 2009, 18(3): 957—959.
- [6] 孟庆香, 刘国彬, 杨勤科. 黄土高原降水量的空间插值方法研究[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2006, 34(3): 83—88.
- [7] 祝青林, 张留柱, 于贵瑞, 等. 近 30 年黄河流域降水量的时空演变特征[J]. 自然资源学报, 2005, 20(4): 477—482.
- [8] 段建军, 王小利, 高照良, 等. 黄土高原地区 50 年降水时空动态与趋势分析[J]. 水土保持学报, 2009, 23(5): 143—146.
- [9] 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.
- [10] 穆兴民, 陈国良, 徐学选. 黄土高原降水量与地理因素关系分析[J]. 西北水土保持研究所集刊, 1992, (16): 80—86.
- [11] 李正泉, 于贵瑞, 刘新安, 等. 东北地区降水与湿度气候资料的栅格化技术[J]. 资源科学, 2003, 25(1): 72—77.
- [12] 刘新安, 于贵瑞, 范辽生, 等. 中国陆地生态信息空间化技术研究——温度、降水等气候要素[J]. 自然资源学报, 2004, 19(6): 818—825.
- [13] 穆兴民, 陈国良. 黄土高原降水与地理因素的空间结构趋势面分析[J]. 干旱区地理, 1993, 16(2): 71—76.
- [14] 景 可. 黄土与黄土高原[J]. 大自然, 2005, (1): 11—15.
- [15] 杨勤业. 走近黄土高原[J]. 大自然, 2005, (1): 8—10.

Simulating spatial distribution of precipitation over the Loess Plateau based on macro-geographical factors

SHEN Hong¹, LIU Wen-zhao^{1,2}

(1. College of Resources and Environment, Northwest A & F University, Yangling, Shaanxi 712100, China;

2. Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming in the Loess Plateau, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: Based on three macro-geographical factors, latitude, longitude and elevation, regression models were built for precipitation across the Loess Plateau by adopting trend surface model, stepwise regression analysis and residual interpolation. Through significant tests for the regression models and station validation for the simulations, the results showed that the spatial difference of annual precipitation over the Loess Plateau is largely determined by the three geographical factors involved in this study, and the models were able to be used to depict the fundamental characteristics of spatial precipitation over the Loess Plateau. According to the simulations, the annual precipitation across the Loess Plateau appeared to have remarkable differences, where a clearly downward tendency from southeast to northwest could be seen. The prevailing climate pattern there is semi-arid and semi-humid climate, which takes control of more than 85 percent of the total area. In most regions, the annual precipitation mainly varies ranging from 250 mm to 800 mm.

Keywords: macro-geographical factors; precipitation; the Loess Plateau; spatialization