

黄土高原降水计算插值与插值计算结果的对比分析

段建军^{1,2,3}, 高照良¹, 王小利^{2,4}, 张晓萍^{1,3}, 张彩霞^{1,4}, 杨勤科^{1†}, 李锐¹

(1. 中国科学院 水利部 水土保持研究所, 712100, 陕西杨凌; 2. 贵州大学农学院, 550025, 贵阳;
3. 中国科学院研究生院, 100049, 北京; 4. 西北农林科技大学资源环境学院, 712100, 陕西杨凌)

摘要 收集黄土高原及周边地区 74 个气象站 1952—2001 年降水数据, 用 ArcGIS9.3 普通克里金(ordinary kriging)插值法采用计算插值(calculate then interpolate, CI)和插值计算(interpolate then calculate, IC)的方法生成黄土高原地区 1952—2001 年 50 a 平均年降水量和年降水量线性趋势系数空间分布表面, 并对其进行统计分析和地形分析。结果表明: 1) 从插值结果统计值看, CI、IC 法生成的黄土高原地区 50 a 平均年降水量和线性趋势系数空间分布表面平均值分别为 421.65、421.56 mm 和 -0.541 0、-0.423 1 mm/a, 相似系数分别为 99.78 % 和 95.99 %, 二者一致性良好; 2) 从插值结果表面光滑度看, IC 法稍优于 CI 法, 借用地形分析对生成表面进行坡度、坡向运算, 可作为评价表面光滑度、空间数量变化特征和空间方向变化特征的直观方法; 3) 黄土高原地区 50 a 平均年降水量具有东南多西北少、南多北少、东多西少的分布规律, 其中服从东南西北、南北和东西方向递减的地带性分布规律区域占黄土高原地区面积的 89.34 %, 非地带性分布规律区域占 10.66 %; 4) CI 和 IC 法计算的黄土高原地区 1952—2001 年降水线性趋势系数平均 -0.541 0 和 -0.423 1 mm/a, 黄土高原地区年降水量有明显减少趋势。

关键词 降水量; 线性趋势; 计算插值; 插值计算; 空间分布; 克里金; 黄土高原

Comparison and analysis of precipitation surfaces produced by CI and IC two approaches in Loess Plateau

Duan Jianjun^{1,2,3}, Gao Zhaoling¹, Wang Xiaoli^{2,4}, Zhang Xiaoping^{1,3}, Zhang Caixia^{1,4}, Yang Qinke¹, Li Rui¹

(1. Institute of Soil and Water Conservation, CAS&MWR, 712100, Yangling, Shaanxi; 2. College of Agricultural Sciences, Guizhou University, 550025, Guiyang; 3. Graduate School of CAS, 100049, Beijing;
4. Northwest Sci-Tec University of Agriculture and Forestry, 712100, Yangling, Shaanxi: China)

Abstract Collecting precipitation at 74 stations in/ around Loess Plateau Region from 1952 to 2001, surfaces of annual average precipitation and linear trend of Loess Plateau from 1952 to 2001 were interpolated with ARCGIS 9.3 using Geostatistical Analyst adopting “calculate then interpolate” (CI) and “interpolate then calculate” (IC) approach. The Result showed that: 1) Total annual average precipitation of Loess Plateau from 1952 to 2001 and its linear trend coefficient were 421.65 mm, 421.56 mm and -0.462 1 mm/a, -0.423 1 mm/a respectively. Similarity coefficients of them were 99.78 % and 95.99 %, which showed a good accordance between them. 2) Surfaces produced by IC approach were a little smoother than that by CI approach. Terrain analysis methodology was a visualizing method of evaluating the precision, smoothness, the spatial amount change and direction change of precipitation surface and linear trend surface. 3) Area of decreasing direction of spatial trend of precipitation was mainly from Southeast to Northwest, then South to North, Southwest to Northeast and East to West where is up to 89.34 % of Loess Plateau, which can be regarded as zonality distribution law. The others which belonged to non-zonality distribution law are 10.66 %.

收稿日期: 2009-04-18 修回日期: 2009-07-04

项目名称: 中国科学院知识创新重要方向项目“黄土高原水土保持的区域环境效应研究”(KZCX3-SW-421)

第一作者简介: 段建军(1976—), 男, 博士, 副教授。主要研究方向: 区域生态环境与 3S 应用。E-mail: djwjl@yahoo.com.cn
† 责任作者简介: 杨勤科(1962—), 男, 博士, 研究员。主要研究方向: 区域水土流失遥感。E-mail: qkyang@ms.iswc.ac.cn

4) Precipitation of Loess Plateau from 1952 to 2001 has a significant decreasing trend with an average linear trend coefficient of -0.5410 mm/a by CI approach or -0.4231 mm/a by IC approach.

Key words precipitation; linear trend; calculate then interpolate (CI); interpolate then calculate (IC); spatial distribution; Kriging; Loess Plateau

降水是黄土高原地区土壤水、径流水和工农业供水的主要来源。准确光滑的降水空间分布表面是区域土壤侵蚀预报和水文研究等的基础^[1-6],也是全球变化的主要研究内容^[7-11]。研究区域多年平均年降水量空间分布及变化特征可以更好地服务农业生产,已有许多研究利用研究区及周边气象资料,通过空间插值生成研究区气象要素空间分布表面^[1-4,10-14],研究我国不同地区降水分布和变化趋势^[12-25]。部分研究^[9,15-16]表明 20 世纪 70 年代后期以来我国大部地区降水减少。黄河流域 1951—1996 年年降水量呈减少趋势^[17]。200、400 和 800 mm 降水等值线南移^[18]。泾河流域降水量 1960—1999 年呈微弱减少趋势^[8]。渭河流域地表水 1957—2001 年呈显著减少趋势^[19]。

通常要生成的气象要素空间分布表面不是直接由实际观测数据空间插值生成,而是首先要对观测数据进行系列函数运算或计算机模拟,然后再对新变量空间插值生成需要的表面。与此不同的是也可以先对实际观测数据空间插值成其空间分布表面,然后再对这些空间分布表面进行函数运算或计算机模拟,生成需要的表面。是选择先对观测变量插值,再对插值表面进行计算 (calculate then interpolate, CI),还是先对观测数据进行计算,生成要进行空间插值的变量,然后再进行空间插值 (interpolate then calculate, IC),这 2 种方法生成的空间分布表面精度与光滑度怎样,如何进行简单直观的评价等研究报道鲜见,结论也不一致。A. Stein 等^[26]认为 CI 法比 IC 法可取;冯锦明等^[12]认为二者之间无明显差异,其偏差相对于原始台站值完全可以忽略不计。

基于此,笔者收集黄土高原及周边地区 74 个气象站 1952—2001 年降水量数据,在 ArcGIS 9.3 环境下,用地统计模块 (geostatistical analyst) 普通克里金插值法 (ordinary kriging) 采用 CI 法和 IC 法生成黄土高原地区 1952—2001 年平均年降水量空间分布表面和年降水量线性趋势系数空间分布表面;对比 2 种方法拟合精度、表面光滑度和计算 2 种方法生成的空间分布表面相似系数,分析平均年降水量与线性趋势空间分布特征,以及借鉴地形分析 (3D analyst) 对平均年降水量和年降水量线性趋势系数

空间分布表面进行坡度 (slope) 和坡向 (aspect) 运算,分析平均年降水量与年降水量线性趋势系数空间分布表面地形特征,以期为合理选择区域变量空间插值方法以及黄土高原降水空间特征及动态趋势研究提供参考。

1 资料来源与研究方法

1.1 数据来源与整理

降水数据来自黄土高原及周边地区 74 个气象站 1952—2001 年逐月观测资料 (图 1),数据格式为 .exl。首先用 MS Office excel 2003 计算各站 1952—2001 年 50 a 年降水量,并保存为 .dbf 文件 (理论 3 700 个,实际 3 478 个,缺失 222 个)。

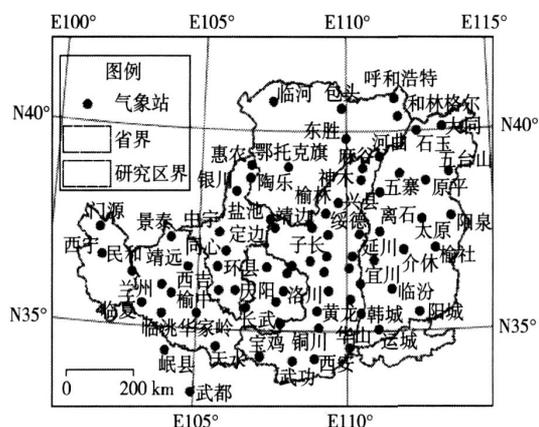


图 1 黄土高原及周边地区气象站分布图

Fig. 1 Distribution of weather stations in/ around Loess Plateau

1.2 平均年降水量及年降水量趋势系数计算

采用直线拟合法进行趋势分析。用直线方程的一次项系数描述趋势大小,其正负表示趋势为增加或减少。将整理好的年降水量 .dbf 文件导入 SPSS15.0,用 Linear Regression 分析模块计算各站 50 a 平均年降水量和年降水量线性趋势系数及年降水量线性趋势系数的显著性检验,然后将计算的结果导出为 .dbf 文件。

1.3 平均年降水量与年降水量线性趋势系数空间分布表面生成

1) CI 法。将 50 a 平均年降水量和降水量线性趋势系数 .dbf 文件和站点经纬度 .dbf 文件分别导入

ArcGIS 9.3, 用 JOIN 命令将其合并, 然后用 Geostatistical Analyst 模块普通克里金插值法插值生成 1 km ×1 km GRID 文件。

2) IC 法。首先将 50 a 年降水量 .dbf 文件和站点经纬度 .dbf 文件导入 ArcGIS 9.3, 用 JOIN 命令将其合并; 然后设置筛选条件, 依次筛选逐年年降水量记录, 用 Geostatistical Analyst 模块普通克里金插值法插值生成各年 1 km ×1 km GRID 文件; 最后用 ArcGIS Workstation AML 宏语言编写程序, 以 1952—2001 年各年降水量空间分布表面为输入, 计算并输出 50 a 平均年降水量空间分布表面和年降水量线性趋势系数空间分布表面。

研究区外东西北方向没有观测数据, 因此插值时对插值表面进行扩展以充满整黄土高原地区, 最后再用黄土高原地区边界图切割生成最终图件, 然后进行统计分析和地形分析等。

1.4 空间分布表面精度检验及相似系数计算

空间分布表面精度检验采样交互验证方法进行, 即依次假定 74 个站点中有 1 个站点数据缺失, 并用其余 73 个站点或一定距离内的站点数据插值估算, 将估算结果与实测值进行比较, 根据估计值与实测值相关性判定插值精度。

CI、IC 2 种方法生成的空间分布表面一致性采用统计值对比法和相似系数计算法定量描述。统计值描述二者之间的数值差异, 相似系数描述二者空

间分布差异。相似系数计算公式^[10]为

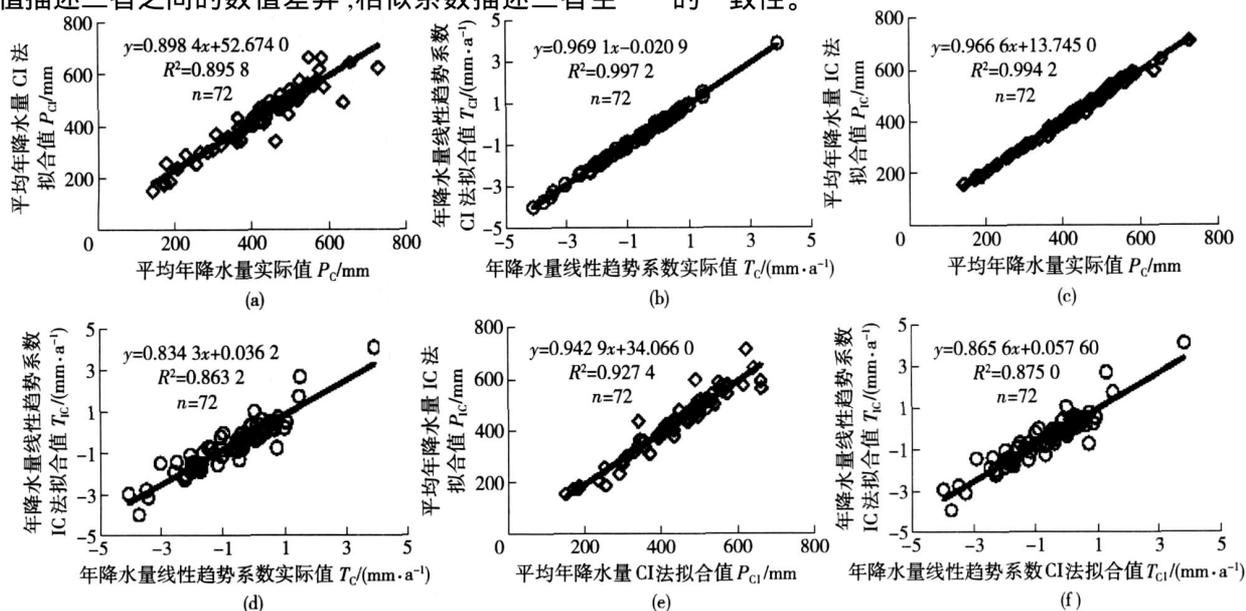
$$\cos_{CI, IC} = \frac{P_{G_{CI}} P_{G_{IC}}}{\sqrt{P_{G_{CI}}^2} \sqrt{P_{G_{IC}}^2}}$$

式中: $\cos_{CI, IC}$ 为 CI 与 IC 法生成的空间分布表面的相似系数; P 为栅格单元的值; G_{CI} 和 G_{IC} 分别为 CI 和 IC 法生成的平均年降水量空间分布表面和年降水量线性趋势系数空间分布表面。相似系数 $\cos_{CI, IC} = 1$ 表明二者完全相似, $\cos_{CI, IC} = -1$ 表明二者完全相反, $\cos_{CI, IC} = 0$ 表明二者完全不同。

2 结果与分析

2.1 空间分布表面精度

CI、IC 2 种方法生成的黄土高原地区 1952—2001 年平均年降水量和年降水量线性趋势系数空间分布表面交互验证结果如图 2 所示, 可以看出: 平均年降水量实际值、2 种方法拟合值 P_C 、 P_{CI} 、 P_C 、 P_{IC} 及 P_{CI} 、 P_{IC} 确定系数分别为 0.895 8、0.994 2、0.927 4, 年降水量线性趋势系数实际值、2 种方法拟合值 T_C 、 T_{CI} 、 T_C 、 T_{IC} 及 T_{CI} 、 T_{IC} 确定系数分别为 0.997 2、0.863 2、0.875 0, 均达到 99% 极显著相关水平。表明普通克里金插值 CI 和 IC 2 种方法均能对黄土高原地区 1952—2001 年平均年降水量和年降水量线性趋势系数空间分布表面进行理想拟合, 拟合结果具有良好的



岷县站和武都站在黄土高原地区范围之外, 未进行交互验证。

图 2 黄土高原地区 72 个站点 50 a 平均年降水量及线性趋势系数实际值与 CI、IC 2 种方法拟合值的相关性比较

Fig. 2 Relationship among precipitation by CI and IC approach, annual average precipitation and linear trend coefficient

2.2 平均年降水量与年降水量线性趋势空间分布表面及其统计值对比

CI、IC 2 种方法生成的黄土高原地区 50 a 平均年降水量和年降水量线性趋势系数空间分布表面如图 3 所示,统计值见表 1。从图 3 (a)、(b)、表 1 可知,2 种方法生成的平均年降水量空间分布表面最大值、最小值、平均值相差较小,相似系数 99.78%,二者一致性良好。降水量空间分布特征为南高北低、东高西低,从东南向西北递减。二者年降水量最高值均出现在华阴县,前者 729.49 mm,后者 710.76 mm,相差 18.73 mm。低值区均出现在内蒙古临河县,最小值前者(140.71 mm)较后者(158.76 mm)小 18.05 mm。

黄土高原地区 1952—2001 年平均年降水量 CI、IC 2 种方法计算结果分别为 421.61 mm(2 629 亿 1 810 万 m³)和 421.56 mm(2 628 亿 8 692 万 m³),二者相差 0.05 mm(3 118 万 m³),相对误差 0.011 9%。杨文治^[27]计算黄土高原(57.08 万 km²)年降水量为

2 386.91 亿 m³,根据面积(研究区面积 62.36 万 km²)比换算平均年降水量为 2 607.72 亿 m³。中国科学院黄土高原综合考察队^[28]估算 1956—1979 年黄土高原(63.38 万 km²)平均年降水量为 2 757 亿 m³,根据面积比换算平均年降水量为 2 712.65 亿 m³。2 种方法估算值与其差异不大,且在二者之间,说明本文计算结果比较可靠。

CI、IC 2 种方法计算的黄土高原地区 1952—2001 年年降水量线性趋势系数空间分布表面如图 3 (c)、(d)所示,二者相似系数为 95.99%。其统计值见表 1,2 种方法生成的年降水量线性趋势系数空间分布表面最大值分别为 3.841 0 和 4.134 7 mm/a,最小值分别为 -4.048 1 和 -4.018 6 mm/a,平均值分别为 -0.541 0 和 -0.423 1 mm/a,二者相差不大,与实际值吻合较好。从空间分布上看,黄土高原地区年降水量线性趋势系数有明显空间分异。青海门源、山西五台等地年降水量线性趋势系数 3.0 mm/a,表明年降水量有显著增加。华山—铜川—洛川—

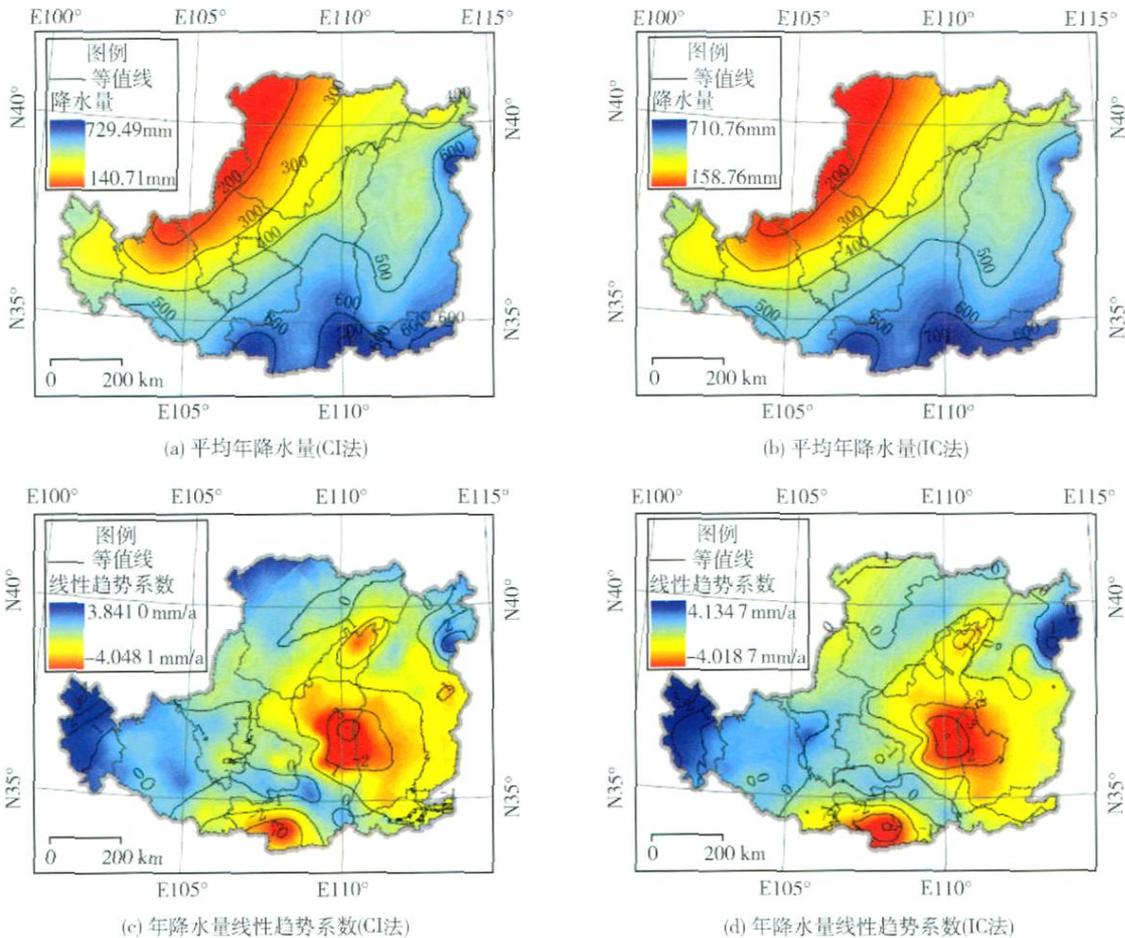


图 3 CI、IC 2 种方法生成的黄土高原地区 50 a 平均年降水量及其线性趋势系数空间分布表面

Fig. 3 Surfaces of annual average precipitation and its linear trend from 1952 to 2001 in Loess Plateau created by CI and IC approach

长武—西峰—平凉—海源—景泰一线呈现出年降水量增加的趋势;而以武功为中心的关中地区、以延长—延川为中心的黄土高原中东部地区和以府谷为中

心的晋陕蒙三角区是降水量减少的地区,尤以关中平原中部和黄土高原中部减少最明显,其线性趋势系数 -2.5 mm/a 。

表 1 CI、IC 法生成的黄土高原地区 50 a 平均年降水量与年降水量线性趋势系数空间分布表面统计值与相似系数

Tab. 1 Difference between surface of annual average precipitation and its linear trend from 1952 to 2001 in Loess Plateau created by CI and IC approach

项 目	平均年降水量					年降水量线性趋势系数				
	最大值	最小值	均值	标准差	相似系数	最大值	最小值	均值	标准差	相似系数
	mm	mm	mm	mm	%	mm a^{-1}	mm a^{-1}	mm a^{-1}	mm a^{-1}	%
站点实际值	730.46	141.17	425.15	121.82		3.9058	-4.0957	-0.7263	1.3791	
CI	729.49	140.71	421.61	126.81	99.78	3.8410	-4.0481	-0.5410	1.0926	95.99
IC	710.76	158.76	421.56	123.93		4.1347	-4.0186	-0.4231	1.0054	

2.3 平均年降水量与线性趋势空间分布表面光滑性与地形分析

理想的插值表面不仅要有较高的精度,而且也要有较好的光滑性。笔者借鉴地形分析方法,利用 ArcGIS 地形分析模块(3D analyst)对平均年降水量和年降水量线性趋势系数空间分布表面分别进行坡度(slope)和坡向(aspect)运算,生成坡度图和坡向图(图 4)。图 4(a)、(c)、(e)、(g)与图 4(b)、(d)、(f)、(h)相比,前者比后者有更多更明显的纵横交错甚至杂乱无章的“线条”,表明平均年降水量和年降水量线性趋势系数发生了不连续的突变,即不光滑。总的看来 IC 法生成的表面光滑性稍好于 CI 法,因此,地形分析方法可直观描述年降水量及其线性趋势的空间分布梯度和空间分布梯度方向以及空间分布光滑性。

2.4 平均年降水量和年降水量线性趋势空间分布表面特征

平均年降水量和年降水量线性趋势系数空间分布表面地形分析不仅可以分析表面光滑性,还可以分析表面空间数量和方向变化特征。图 4(a)、(b)蓝色表示年降水量空间梯度大的区域,红色表示降水空间梯度小的区域。图 4(c)、(d)蓝色表示年降水量线性趋势系数空间梯度大的区域,红色表示年降水量线性趋势系数空间梯度小的区域。平均年降水量空间梯度大的地区包括陕西华山到山西运城一带、山西原平—大同以北地区、陕西横山—靖边 2 县以及甘肃临夏—临洮、经兰州—榆中直到宁夏同心—海源一带,年降水量空间梯度 0.10 mm/km ,最

高 0.1656 mm/km (图 4(b))。从图 4(e)、(f)平均年降水量坡向图和表 2 可以看出,CI、IC 2 种方法计算的平均年降水量空间递减方向及其分布面积基本一致。平均年降水量空间递减方向主要为东南—西北走向,表明年降水量空间上呈东南—西北递减趋势,其面积占黄土高原地区面积的 47.70%或 49.63%,其次是南北、东北—西南和东西方向,其面积分别占黄土高原面积的 18.59%或 19.40%、11.55%或 11.26%和 10.40%或 10.16%。此外,关中平原从东部华山到中部西安一带,降水由东向西递减,宝鸡到西安的关中西部地区,降水量由西向东递减;充分说明黄土高原地区降水空间格局的异质性、多变性和复杂性。表明黄土高原地区年降水量存在明显地带性分布格局和非地带性分布格局,年降水量受地带性因素和非地带性因素共同作用,有的地方地带性因素起主导作用,有的地方非地带性因素起主导作用。将研究区年降水量由东向西、由南向北、由东南向西北和由西南向东北递减的趋势称为降水受地带性因素控制的地区,其他方向为非地带性因素控制的地区,计算得出年降水量受地带性因素控制的地区面积为 55.02 万 km^2 (IC 法)和 56.40 万 km^2 (CI 法),受非地带性因素控制的地区面积 6.13 万 km^2 (IC 法)和 5.09 万 km^2 (CI 法)。说明黄土高原地区年降水量呈地带性分布规律的地区占总面积的 89.34%,而非地带性分布规律的地区占 10.66%。图 4(g)、(h)为 50 a 降水量线性趋势系数坡向图,其空间方向变化更为复杂,在此不再赘述。

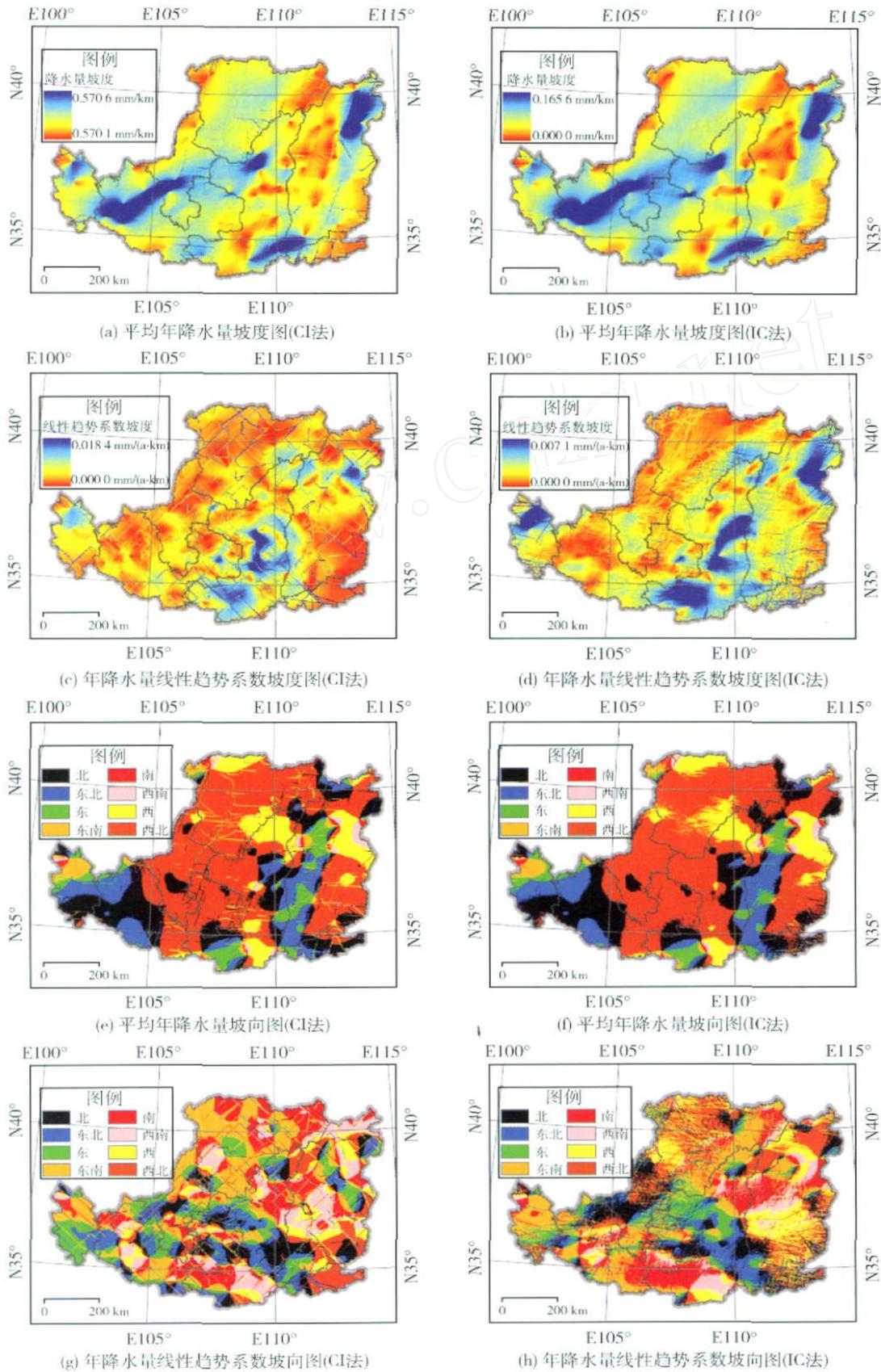


图 4 黄土高原地区 50 a 平均年降水量和年降水量线性趋势系数空间分布坡度图和坡向图

Fig. 4 Slope and aspect of annual average precipitation and annual precipitation linear trend surfaces of Loess Plateau

表 2 平均年降水量坡向图中不同坡向面积统计值及其比例
 Tab. 2 Area of different direction in aspect of annual average precipitation maps

方向	面积/ km ²			比例/ %		
	CI	IC	平均	CI	IC	平均
南北	115 942	121 001	118 472	18.59	19.40	19.00
东北	72 022	70 191	71 107	11.55	11.26	11.40
西东	37 623	30 470	34 047	6.03	4.89	5.46
东南	16 873	14 985	15 929	2.71	2.40	2.55
北南	6 824	5 472	6 148	1.09	0.88	0.99
西南	12 032	8 648	10 340	1.93	1.39	1.66
东西	64 847	63 355	64 101	10.40	10.16	10.28
西北	297 442	309 483	303 463	47.70	49.63	48.66
地带性分布	550 253	564 030	557 142	88.24	90.45	89.34
非地带性分布	61 320	50 927	56 124	11.76	9.55	10.66
合计	623 605	623 605	623 605	100.00	100.00	100.00

3 结论

1) 从插值结果统计值看, IC、CI 法均可生成较理想的黄土高原地区 1952—2001 年平均年降水量和降水量线性趋势系数空间分布表面, 其平均值分别为 421.65、421.56 mm 和 -0.541 0、-0.423 1 mm/a, 相似系数分别为 99.78 % 和 95.99 %。2 种方法插值结果一致性良好。

2) 从插值结果表面精度和光滑度看, IC 法稍优于 CI 法。借鉴地形分析方法, 对生成的空间分布表面进行坡度和坡向运算, 可对其光滑度作出直观分析和评价, 还可对其空间特性进行地形分析和可视化表达。

3) 时域上, 黄土高原地区年降水量表现为明显减少趋势, 年降水量线性趋势系数存在明显空间变异。CI、IC 法计算的黄土高原地区 1952—2001 年年降水量线性趋势系数在 3.841 0 ~ -4.048 1 mm/a 或 4.134 7 ~ -4.018 6 mm/a 之间变动, 均值为 -0.541 0 或 -0.423 1 mm/a。线性趋势系数增加地区主要分布在青海门源和山西五台一带, 减少地区包括以武功为中心的关中地区和延长-延川为中心的黄土高原中部地区。

4) 黄土高原地区 1952—2001 年 50 a 平均年降水量呈显著的空间异质性结构。降水空间趋势以东南—西北、南北、西南—东北和东西方向递减, 其面积占黄土高原总面积的 89.34 %, 可视为服从降水地带性分布规律的区域。其他方向以非地带性因素影响为主, 其面积占黄土高原总面积的 10.66 %。

4 参考文献

- [1] Singh V P, Birsoy Y K. Comparison of the methods of estimating mean areal rainfall. *Nordic hydrology*, 1975, 6 (4): 222-241
- [2] Hutchinson M F. Interpolating mean rainfall using thin plate smoothing splines. *International Journal of Geographical Information Systems*, 1995 (9): 385-403
- [3] Tabios G Q, Salas J D. A comparative analysis of techniques for spatial interpolation of precipitation. *Water Resources Bulletin*, 1985, 21 (3): 365-380
- [4] 汪丽娜, 穆兴民, 张晓萍, 等. 陕北黄土丘陵区流域面平均雨量推算方法. *中国水土保持科学*, 2008, 6 (2): 39-43
- [5] 王浩, 杨爱民, 周祖昊, 等. 基于分布式水文模型的水土保持水文水资源效应研究. *中国水土保持科学*, 2005, 3 (4): 6-10
- [6] 牛文全, 吴普特, 冯浩, 等. 区域雨水资源化潜力计算方法与利用规划评价. *中国水土保持科学*, 2005, 3 (3): 40-44
- [7] 杨维西. 全球变化中的中国干旱区响应与趋势. *林业科学*, 2008, 44 (8): 124-130
- [8] 袁素芬, 唐海萍. 全球气候变化下黄土高原泾河流域近 40 年的气候变化特征分析. *干旱区资源与环境*, 2008, 22 (9): 43-48
- [9] 刘晓东, 安芷生, 方建刚, 等. 全球气候变暖条件下黄河流域降水的可能变化. *地理科学*, 2002, 22 (5): 513-519
- [10] 林忠辉, 莫兴国, 李宏轩, 等. 中国陆地区域气象要素的空间插值. *地理学报*, 2002, 57 (1): 47-55
- [11] 阎洪. 薄板光顺样条插值与中国气候空间模拟. *地理*

- 科学, 2004, 24(2): 163-169
- [12] 冯锦明, 赵天保, 张英娟. 基于台站降水资料对不同空间插值方法的比较. 气候与环境研究, 2004, 9(2): 261-277
- [13] 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、降水要素). 自然资源学报, 2004, 19(6): 818-825
- [14] 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. 自然资源学报, 2005, 20(4): 478-482
- [15] 任国玉, 吴虹. 我国降水变化趋势的空间特征. 应用气象学报, 2000, 11(3): 322-330
- [16] 林学椿, 于淑秋. 近40年来我国气候趋势. 气象, 1990, 16(10): 16-21
- [17] 李月洪. 中国干旱半干旱区降水异常因素分析. 中国短期气候变动及其因素研究. 北京: 气象出版社, 1996: 43-48
- [18] 庞爱萍, 李春晖, 杨志峰, 等. 近50年黄河流域降水变化的时空特征. 北京师范大学学报: 自然科学版, 2008, 44(4): 420-424
- [19] 张建兴, 马孝义, 赵文举, 等. 黄土高原地区干旱长期变化趋势及预测. 干旱地区农业研究, 2008, 26(3): 1-6
- [20] 王菱. 华北山区年降水量的推算和分布特征. 地理学报, 1996, 51(2): 164-171
- [21] 赵庆云, 李栋梁, 李耀辉. 西北区降水时空特征分析. 兰州大学学报: 自然科学版, 1999, 35(4): 124-128
- [22] 徐宗学, 张楠. 黄河流域近50a降水变化趋势分析. 地理研究, 2006, 25(1): 27-34
- [23] 林纾, 王毅荣. 中国黄土高原地区降水时空演变. 中国沙漠, 2007, 27(3): 502-508
- [24] 蔡新玲, 王繁强, 吴素良. 陕北黄土高原近42年气候变化分析. 气象科技, 2007, 35(1): 45-48
- [25] 杜军, 马玉才. 青藏高原降水变化趋势的气候分析. 地理学报, 2004, 59(3): 375-382
- [26] Stein A, Staritsky I G, Bouma J, et al. Simulation of moisture deficits and areal interpolation by universal cokriging. Water Resources Research, 1991, 27: 1963-1973
- [27] 杨文治. 黄土高原土壤水资源与植树造林. 自然资源学报, 2001, 9(5): 434-438
- [28] 中国科学院黄土高原综合考察队. 黄土高原地区水资源问题及其对策. 北京: 中国科学技术出版社, 1990

(责任编辑:程云)

(上接第13页)

- [2] 周佩华, 豆葆璋, 孙清芳, 等. 降雨能量的试验研究初报. 水土保持通报, 1981, 1(3): 53-63
- [3] 雷廷武, 张晴雯. 细沟侵蚀动力过程输沙能力试验研究. 土壤学报, 2002, 39(4): 476-482
- [4] 谢承迪. 坡流类型及坡地水力侵蚀计算方法. 水土保持通报, 1999, 19(4): 1-6
- [5] 费祥俊. 悬移质水流挟沙能力与输沙特性. 泥沙研究, 2003(3): 30-34
- [6] 李鹏, 李占斌, 郑良勇, 等. 坡面径流侵蚀产沙动力机制比较研究. 水土保持学报, 2005, 19(3): 66-69
- [7] 郑良勇, 李占斌, 李鹏. 黄土区陡坡径流水动力学特性试验研究. 水利学报, 2004(5): 46-51
- [8] Nearing M, Bradford M, Parker C. Soil detachment by shallow flow at low slopes. Soil Sci Soc of Am J, 1991, 55(2): 339-344
- [9] Abrahams A D, Jparsons G. Rill hydraulics on a semiarid hill slope, southern Arizona. Earth Surface Processes and Landforms, 1996, 21(2): 35-47
- [10] King K W, Norton L. Methods of rill flow velocity dynamics. American Society of Agricultural Engineering Meeting Presentation Paper, 1992(2): 542-545
- [11] 孙中峰, 周玉喜, 朱金兆, 等. 晋西黄土丘陵区坡面刺槐林地土壤水分研究. 中国水土保持科学, 2007, 5(5): 43-49
- [12] 张晴雯, 雷廷武. 黄土细沟侵蚀过程中输沙能力确定的解析法. 中国农业科学, 2004, 37(5): 700-703

(责任编辑:宋如华)