

降雨信息空间插值研究评述与展望

张继国^{1,2}, 谢平¹, 龚艳冰², 刘高峰²

(1. 武汉大学 水资源与水电工程科学国家重点实验室, 湖北 武汉 430072;

2. 河海大学 水利信息统计与管理研究所, 江苏 常州 213022)

摘要: 降雨空间分布对于区域水文模拟、水资源规划与管理、旱涝灾害评估以及生态环境治理等均具有基础性的科学研究意义,是水文水资源学科中的热点研究课题之一。本文主要从方法论的角度评述了微观层面的降雨信息空间插值研究进展,首先探讨了确定性方法与空间统计学方法各自的优势与局限性,最后着重论述了利用信息熵的理论与方法研究降雨信息插值的科学基础,以及对其可行性、合理性和技术特征予以了展望。

关键词: 降雨信息; 空间插值; 信息熵; 空间统计学

中图分类号: P426.615

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2012)01-0006-04

Review and perspectives of the research on spatial interpolation of rainfall information

ZHANG Jiguo^{1,2}, XIE Ping¹, GONG Yanbing², LIU Gaofeng²

(1. State Key Laboratory of Water Resources and Hydropower Engineering Science, Wuhan University, Wuhan 430072, China; 2. Institute of Hydraulic Information Statistics and Management, Hohai University, Changzhou 213022, China)

Abstract: Research on rainfall distribution is of basic scientific significance for regional hydrological modeling, planning and management of water resources, flood and drought disaster assessment and improvement of ecological environment. This paper mainly commentaried research progress of spatial interpolation of rainfall data from the visual angle of methodology on a microscopic level. Firstly, it separately discussed advantages and disadvantages of the deterministic method and the spatial statistics method used to research spatial interpolation of rainfall data, discoursed upon the scientific basis of information entropy theory and methods, and studied the spatial interpolation of rainfall, finally prospect the feasibility, rationality and technical characteristics of information entropy method.

Key words: rainfall information; spatial interpolation; information entropy; spatial statistics

1 概述

降雨信息是水文模型的主要输入项,它是影响流域水循环最活跃的因素,其时空分布不均匀性对流域产汇流的形成起着决定性的作用^[1-3],而且降雨时空分布不均匀性考虑地越充分,水文过程模拟精度也就越高^[4-5]。研究还表明,流域洪水过程受控于降雨的时空分布,洪水预报的不确定性主要来源于降雨的不确定性而非流域模型的不确定性^[6-7]。因而降雨时空分布研究对于区域水文、水资源分析以及区域水资源管理、旱涝灾害管理、生态环境治理等都具有重要意义。于是,如何根据现有雨量观测站的数据生成空间计算单元在不同时间尺度下的雨量,且尽可能地客观反映降雨空间变异性,

是一个亟待解决的问题^[7]。

降雨受控于众多的因素,具有大量的不确定性现象,所以降雨的时空分布问题历来受到很多学者的广泛关注,是水文科学中的焦点问题之一,而且在相关理论和方法研究方面迫切需要不断地创新以及多学科的交叉。1991年,美国在主题为“水文学研究的进展与机遇”的年度报告以及专著《水文学的机遇》中指出,在水文学研究及其诸多应用领域中要求有更多的交叉学科方法,需要积极鼓励新思想、新方法的开拓。夏军^[8]强调,我国在新时期水文研究所面临的任务仍然是:宏观、中观与微观水文开放系统与封闭系统的信息度量与不确定性;水文信息理论与水文信息的量度和水文信息理论在洪水、干旱和环境分析中的应用,以及水文时空变化的不确

收稿日期:2011-10-31; 修回日期:2011-11-14

基金项目:武汉大学水资源与水电工程科学国家重点实验室开发研究基金项目(2010B067)

作者简介:张继国(1956-),男,湖北汉川人,博士,教授,主要从事信息熵理论与应用及其水文不确定性研究。

定性量度等。究其原因,一方面与水文输入变量和水文状态变量观测精度有关,另一方面又与复杂性认识不足,尤其是与缺乏充分信息模型有密切关联^[9]。

2 确定性方法

降雨时空分布研究大多是沿着宏观(全局)与微观(局部)两个方向在发展。在宏观层面,一般是分析流域或者行政区域内降雨在时间(年、季、月、日等)和空间(由地理环境构成的不同区域等)上的分布不均匀性或者变化趋势^[10-13]。就方法论而言,所采用的技术大多是传统型的,比如降水不均匀性系数、降水集中度、面雨量离差系数等。最近陆续有非传统的技术被应用,例如云模型^[14]、模式识别^[15]以及信息熵^[16-17]等。从微观层面来看,其研究目的就是内插或外推无观测资料地点的雨量以及推求特定区域上的平均雨量。所使用的方法较多^[18-23],大致可以分为统计模型法、空间插值法和综合法等。较常使用的研究方法有空间插值法,该方法可以归结为二类,一类是确定性方法,另一类是空间统计方法。确定性方法中最具代表性的是反距离权重法和泰森多边形法。这种传统的概念性模型对降雨的空间变化一般采用均化处理方式,用以方便产流计算。在一定条件下,确定性方法虽然对局部区域内降雨插值具有良好的效果,但还是难以客观反映降雨的空间分布。原因之一是将各站点观测值作为一组确定性的数值群,忽略了降雨量的不确定性属性,之二是对各站点观测值之间的相关性考虑地不够充分。而且泰森多边形法计算面平均雨量时,需要根据边界和各个点位置来手工划分和量测加权面积,导致计算工作量很大。反距离权重法虽然有“地理学第一定律”(邻近的区域比距离远的区域更相似)作为理论支撑,使得该方法更具有科学性。但是,由于流域内的地理、气象等自然条件的千差万别,距离待测点远的观测值不一定比近的影响小,所以使反距离权重法成立的“地理学第一定律”借用在降雨空间插值时难免存在一定的局限性。

3 空间统计学方法

降雨量是具有随机性(不确定性)与结构性(相关性)双重特征的区域化变量^[12]。确定性方法在一定程度上忽略了降雨在时间上的随机性,也未能有效考虑不同观测点的降雨信息在空间上的相关性。而空间统计学是以区域化变量理论为基础,以变异

函数为基本工具来研究展布于空间并呈现一定结构性与随机性的自然现象的科学,所以空间统计学方法可以克服上述确定性方法所面临的不足。因而,使用空间统计学方法来研究降雨的插值问题受到了广泛地重视^[24-27],根据国内外权威数据统计,随着空间统计学的理论与方法不断完善,其应用领域从地质、矿业逐渐拓展到土壤、水文水资源、农业、气象、海洋、生态、环境等领域,而在空间统计学方法所涉及的众多领域中,与水文水资源密切相关的论文数占到了第二位^[28]。空间统计学方法中最具代表性的是 Kriging 法以及由它派生出的多种形式。从统计意义上说,Kriging 法是从变量相关性和变异性出发,在有限区域内对区域化变量的取值进行无偏最优估计的一种统计方法;从插值角度上讲,Kriging 法以空间结构分析为基础,充分利用数据空间场的性质,在插值过程中对空间数据求线性最优,可以反映空间场的各向异性,是一种无偏估计的内插方法。这些方法的优点是有较为坚实的理论基础和逻辑严密的计算方法。但是,从地学统计中移植过来用在降雨空间插值研究中却面临着几个关键问题:①方法复杂,计算量大,尤其是在几个标准变异函数模型的组合时;②变异函数模型需要根据人的经验来选定,况且不同的变异函数模型对后期的预测精度会产生较大影响^[29-30];③先验假定降雨这个区域化变量服从高斯分布,且满足统计意义上的二阶平稳条件,也就是稳态要求。

但是,在多数情况下,降雨量不完全满足稳态条件,也不严格服从高斯分布^[31-32],也就是非稳态性。针对上述这种条件假设过于简化或“理想化”的降雨空间插值问题,近年来不断有学者潜心研究,力图从不同的角度去加以改进。譬如,Ming Li 和 Quanxi Shao^[31]提出的核平滑方法有效地避免了二阶平稳的假定,使用该方法对澳大利亚的日降雨插值时比普通 Kriging 法以及利用了卫星遥测数据作为辅助变量的 CoKriging 法有着更小些的偏差;Z. K. Bargaoui 和 A. Chebbi^[33]提出了基于位置-降雨强度-降雨历时的所谓 3-D Krging 法,它的核心是 3-D 变异函数,而不是传统的 2-D 变异函数模型,研究结果显示该方法比经典的 Kriging 法具有更高的插值精度;Ramesh S. V. Teegavarapu^[34]用人工神经网络去拟合变异函数,而不是“先验”地去假定变异函数模型,其改进的 Kriging 法比普通的 Kriging 法存在诸多优势;T. G. Orton 和 R. M. Lark^[35]根据贝叶斯极大熵原理,充分利用了先验知识和“软”数

据,从而提高了使用 Kriging 方法的预测精度。

4 研究展望—信息熵方法

通过以上分析,水文学的降雨信息空间插值研究存在两方面的缺憾,第一,由于降雨是一个非常复杂的过程,总是受到众多因素的影响,广泛存在着随机性、模糊性,是一个复杂的非线性过程。因此,以上方法的理论假设过多的排除了一些约束条件,从而导致了模型假设过于简化或“理想化”,未能充分考虑实际降雨空间分布的地理特性,导致信息的流失或失真,直接的后果就是使得插值角度难以获得保证;第二,没有充分考虑降雨观测资料的不确定性,所以从工程实践的角度出发,很有必要推出新的空间插值方法,以提供更多的选择。而且从理论发展的角度,我们觉得十分有必要做出新的探索,以丰富水文学的不确定性理论。

另外,上述的确定性方法和空间统计学方法尽管也能得到较为满意的结果,但是仍然没有脱离原有的理论框架,更没能在理论上和方法上自成体系。近些年来,不断有新的方法应用于水文科学中,从而建立起了直接服务于水文科学的交叉学科,比如模糊水文学^[36-37]。信息熵(Information Entropy)应用于水文学科又是一个明显的例证。事实上,近 30 年来,作为有效刻画不确定性的信息熵被广泛地用于水文站网优化^[38]、水文预报^[39]、水质水环境评价^[40]、水文系统建模^[41]以及不确定性分析^[42]等,显示出了较强的生命力。美国学者 Singh 教授^[43]较系统全面地总结了上世纪后 20 年中信息熵在水文水资源中的应用成果。

根据作者的探索以及其他学者卓有成效地研究工作,发现信息熵及其空间分布,具有定量分析各个降雨观测点的信息特性,以及和邻近多站点信息的相关性之功能,即既能刻画降雨变量的随机性,又能描述其结构性。例如,文献[44]较早地应用信息熵的这种特性与功能重点研究了淮河流域降雨时空分布不均匀性问题,初步揭示了流域降雨信息在传递、相关性等方面的规律。

信息熵理论中包括极大熵原理、最小互熵原理、互信息理论以及信息传递理论等,最近,信息熵的理论体系与技术又得到了不断地充实与完备。本文作者之一较早将信息场应用在降雨分布不均匀性的研究中^[16-17]。胡昌平^[45]给出了信息场的概念,并研究了信息势、信息价值度量等。张凯^[46-47]对信息场集合、信息场可变量、信息点的相互作用、信息场的

强度、信息场聚点和信息场测度等方面予以了较为深刻地分析。近年来,我们研究了信息场的数学结构,并在此架构下,探讨了信息强度与相关性问题的,定义了信息传递函数以及信息点传递能力的度量指标,比如信息距离和信息面等,同时给出了相应的计算公式^[48]。丁晶等^[49]提出了建立在互信息基础上的广义相关系数,它不仅能描述变量间的线性相关,也能描述非线性关系,而且其优点还在于对变量的分布没有任何特殊要求。郭衍涛^[50]利用广义相关系数对海洋资料的相关性予以了分析,验证了广义相关系数既可以判别线性相关也可以判别非线性相关的推断。

5 结 语

总而言之,有必要也有可能做到在非稳态环境下(主要包括降雨不满足二阶平稳、还有降雨时空动态变化、气候变化对降雨的扰动等),构建信息场内降雨信息的传递规律以及信息点的信息传递能力的度量指标,基于广义相关系数的降雨信息时空变异特征,以及降雨空间分布结构等理论,并在此理论基础之上,最终构建以极大熵为优化目标并且适合典型区域的降雨空间插值模型。与前述方法有所不同,降雨信息空间插值的信息熵方法将具备下列重要特征:①对降雨变量的统计属性没有特定要求——非稳态;②综合研究地理、地貌、尤其是气候等因素与降雨过程的耦合过程——多变量;③考虑降雨变量之间的广义相关性——非线性;④在时间、空间构成的广义二维坐标系上建立信息场,探索降雨的时空演变规律——时空动态。

参考文献:

- [1] Duncan M R, Austin B, Fabry F, et al. The effect of gauge sampling density on the accuracy of streamflow prediction for rural catchments [J]. Journal of Hydrology, 1993, 142: 445-476.
- [2] 梁忠民, 李彬权, 余钟波. 考虑空间变异性的统计产流模型研究[J]. 南京大学学报(自然科学), 2009, 45(3): 403-408.
- [3] Liang X, Lettenmaier D P, Wood E F. One-dimensional statistical dynamic representation of subgrid spatial variability of precipitation in the two-layer variable infiltration capacity model [J]. Journal of Geophysical Research, 1996, 101(16): 403-422.
- [4] 张雪松, 郝芳华, 张建永. 降雨空间分布不均匀性对流域径流和泥沙模拟影响研究[J]. 水土保持研究,

- 2004,11(1):9-12.
- [5] 姜红梅,任立良,袁飞.降水空间不均匀性对径流过程模拟的影响[J].水文,2004,24(2):1-6.
- [6] Mohamed A S. Reliability estimation of rainfall-runoff models [D]. New York:State University of New York, 1999.
- [7] 李吉顺,王昂生,陈家田.降水时空分布变化是长江流域水旱灾害加重的主要原因[J].中国减灾,1999,9(4):27-30+40.
- [8] 夏军.水文学发展的思考.中国科学基金[J],2000(5):293-296.
- [9] 叶守泽,夏军.水文科学研究的世纪回眸与展望[J].水科学进展,2002,13(1):83-104.
- [10] 顾万龙,王纪军,朱业玉,等.淮河流域降水量年内分配变化规律分析[J].长江流域资源与环境,2010,19(4):426-431.
- [11] 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.
- [12] 王兆礼,陈晓宏,张灵,等.近40年来珠江流域降水量的时空演变特征[J].水文,2006,26(6):71-75.
- [13] 任国玉,吴虹,陈正洪.我国降水变化趋势的空间特征[J].应与气象学报,2000,11(3):322-330.
- [12] 李丽娟,王娟,李海滨.无定河流域降雨量空间变异性研究[J].地理研究,2002,21(4):434-440.
- [14] 刘德地,陈晓宏,楼章华.基于云模型的降雨时空分布特征分析[J].水利学报,2009,40(7):850-857.
- [15] 陈晓宏,刘德地,王兆礼.降雨空间分布模式识别[J].水利学报,2006,37(6):711-716.
- [16] 张继国,刘新仁.降雨时空分布不均匀的信息熵分析(I)[J].水科学进展,2000,11(2):133-137.
- [17] 张继国,刘新仁.降雨时空分布不均匀的信息熵分析(II)[J].水科学进展,2000,11(2):138-143.
- [18] Guennia L, Hutchinson M F. Spatial interpolation of the parameters of a rainfall model from ground-based data [J]. Journal of Hydrology, 1998,212/213:335-347.
- [19] Caruso C, Quarta F. Interpolation methods comparison [J]. Computers Math. Applic. 1998,35(12):109-126.
- [20] 李新,程国栋,卢玲.空间内插方法比较[J].地球科学进展,2000,15(3):260-265.
- [21] 秦伟良,刘悦.空间插值法在降水分布中的应用[J].南京信息工程大学学报(自然科学版),2010,2(2):162-165.
- [22] 朱会义,贾绍凤.降雨信息空间插值的不确定性分析[J].地理科学进展,2004,23(2):34-42.
- [23] 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.
- [24] Lloyd C D. Multivariate interpolation of monthly precipitation amount in the United Kingdom[J]. Quantitative Geology and Geostatistics, 2010,16:27-39.
- [25] 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.
- [26] Sun Y, Kang S, Li F, et al. Comparison of interpolation methods for depth to groundwater and its temporal and spatial variations in the Minqin oasis of northwest China [J]. Environmental Modelling & Software, 2009, 24: 1163-1170.
- [27] Chen D L, Ou T H, Gong L B, et al. Spatial interpolation of daily precipitation in China:1951-2005 [J]. Advances in Atmospheric Sciences, 2010, 27(6): 1221-1232.
- [28] 郭怀成,周丰,刀谓.地统计方法学研究进展[J].地理研究,2008,27(5):1191-1202.
- [29] Lin G F, Chen L H. A spatial interpolation method based on radial basis function networks incorporating a variogram model [J]. Journal of Hydrology, 2004,288:288-298.
- [30] Schafer-Neth C, Paul A, Mulitza S. Perspectives on mapping the MARGO reconstructions by variogram analysis kriging and objective analysis [J]. Quaternary Science Reviews 2005,24(7-9):1083-1093.
- [31] Li M, Shao Q X. An improved statistical approach to merge satellite rainfall estimates and raingauge data [J]. Journal of Hydrology, 2010,385:51-64.
- [32] 廖华胜,李连侠.地下水非平稳随机模型及空间变异性与非均匀性相互关系研究的展望[J].水利学报,2004,34(10):1-11.
- [33] Bargaoui Z K, Chebbi A. Comparison of two kriging interpolation methods applied to spatiotemporal rainfall [J]. Journal of Hydrology, 2009,365:56-73.
- [34] Teegavarapu R S V. Use of universal function approximation in variance-dependent surface interpolation method: An application in hydrology [J]. Journal of Hydrology, 2007,332:16-29.
- [35] Orton T G, Lark R M. Accounting for the uncertainty in the local mean in spatial prediction by Bayesian Maximum Entropy [J]. Stoch. Environ. Res. Risk Assess., 2007, 21:773-784.
- [36] 陈守煜.工程水文水资源系统模糊集分析理论与实践[M].大连:大连理工大学出版社,1998.
- [37] 王淑英.水文系统模糊不确定性分析方法的研究与应用[D].大连:大连理工大学,2004.
- [38] Yang Y J, Burn D H. An entropy approach to data collection network design [J]. Journal of Hydrology, 1994(157):307-324.

4 结 语

(1)分蘖后期水分亏缺处理的水稻干物质积累和稻谷产量与对照无显著差异。表明水分亏缺对水稻生长的影响在生育后期能得到很好的弥补甚至超补偿,这与水稻分蘖后期对水分亏缺不敏感有关,当前水稻分蘖后期控制灌溉下限可以适当下调。

(2)拔节孕穗后期和抽穗开花期水分亏缺处理水稻产量与对照差异显著,水分亏缺对作物生长的影响在生育后期无法完全弥补,水稻在拔节孕穗后期和抽穗开花期对水分需求较高,当前控制灌溉下限不宜下调。

(3)施氮水平可以调节水分亏缺对水稻干物质积累和产量的影响,较高的施氮水平可以提高水稻水分亏缺情况下的植株水分利用效率,减小水分亏缺对水稻的危害,达到以肥补水、以水调肥的效果。

参考文献:

- [1] Elias F, Mara A S. Deficit irrigation for reducing agricultural water use[J]. *Journal of Experimental Botany*, 2007, 58(2): 147–159.
- [2] 黄兴法,李永光,王小伟,等. 充分灌与调亏灌溉条件下苹果树微喷灌的耗水量研究[J]. *农业工程学报*, 2001, 17(5): 43–47.
- [3] 孟兆江,贾大林,刘安能等. 调亏灌溉对冬小麦生理机制及水分利用效率的影响[J]. *农业工程学报*, 2003, 19(4): 66–69.

- [4] 丁端锋,蔡焕杰,王健,等. 玉米苗期调亏灌溉的复水补偿效应[J]. *干旱地区农业研究*, 2006, 24(3): 64–67.
- [5] 郭松年,丁林,王福霞. 作物调亏灌溉理论与技术研究进展及发展趋势[J]. *中国农村水利水电*, 2009(8): 12–16.
- [6] 徐俊增,彭世彰,魏征. 分蘖期水分调控对覆膜旱作水稻茎蘖动态影响分析[J]. *河海大学学报*, 2010, 38(5): 511–515.
- [7] Dioufa O, Broub Y C, Dioufa M, et al. Response of pearl millet to nitrogen as affected by water deficit[J]. *Agronomie*, 2004, 24(2): 77–84.
- [8] 彭世彰,魏征,孔伟丽,等. 水肥亏缺下水稻叶片气孔导度与光合速率耦合模型[J]. *应用基础与工程科学学报*, 2010, 18(2): 253–261.
- [9] 韦彩会,李伏生,许春辉. 调亏灌溉及施肥对玉米干物质积累和相关生理性状的影响[J]. *干旱地区农业研究*, 2010, 28(4): 76–83.
- [10] 张永胜,成自勇,薛翎燕,等. 甜椒在非充分灌溉条件下的耗水特性及其与产量的关系[J]. *水资源与水工程学报*, 2009, 20(2): 63–66.
- [11] 彭世彰,徐俊增. 水稻控制灌溉理论与技术[M]. 南京: 河海大学出版社, 2011.
- [12] Cabangon R J, Tuong T P, Castillo E G, et al. Effect of irrigation method and N₂ fertilizer management on rice yield, water productivity and nutrient use efficiencies in typical low land rice conditions in China[J]. *Paddy and Water Environment*, 2004, 2: 195–206.
- [13] 孙永健,孙园园,刘凯,等. 水氮交互效应对杂交水稻结实期生理形状及产量的影响[J]. *浙江大学学报(农业与生命科学版)*, 2009, 35(6): 645–654.

(上接第9页)

- [39] Krstanovic P F, Singh V P. A real-time flood forecasting model based on maximum-entropy spectral analysis; II. Application[J]. *Water Resources Management*, 1993, 7: 131–151.
- [40] Kusmulyono A, Goulter I. Entropy principles in the prediction of water quality values at discontinued monitoring stations[J]. *Stoch. Hydrol. Hydraul.*, 1994, 8(4): 301–317.
- [41] Singh V P, Krstanovic P F. A stochastic model for sediment yield using the principle of maximum entropy[J]. *Water Resour. Res.*, 1987, 23(5): 781–793.
- [42] 张继国,刘新仁. 水文水资源中不确定性的信息熵分析方法综述[J]. *河海大学学报*, 2000, 28(6): 32–37.
- [43] Singh V. P. The use of entropy in hydrology and water resources[J]. *Hydrology Processes*, 1997, 11: 587–626.
- [44] 张继国. 降雨时空分布不均匀性信息熵研究[D]. 南京: 河海大学, 2004.
- [45] 胡昌平. 信息管理科学导论[M]. 北京: 科学技术文献出版社, 1995: 32–36.
- [46] 张凯. 信息场的实变分析[J]. *情报杂志*, 2002(5): 9–11.
- [47] 张凯. 信息场的性能分析[J]. *情报杂志*, 2003(2): 19–20.
- [48] 张继国,何春元. 信息场的数学结构分析[J]. *情报杂志*, 2006, 25(8): 16–17+21.
- [49] 丁晶,王圣元,赵永龙. 以互信息为基础的广义相关系数[J]. *四川大学学报(工程科学版)*, 2002, 34(3): 1–5.
- [50] 郭衍游,侯一筠,刘战庆. 互信息在海洋资料相关分析中的应用[J]. *海洋科学*, 2004, 28(10): 29–33.