水　利　学　报
2010年1月　SHUILI　XUEBAO　第41卷　第1期

文章编号:0559-9350(2010)01-0093-08

基于观测站点生成降水的有效分辨率研究

叶爱中[1]，张利平[2]
（1. 北京师范大学 全球变化与地球系统科学研究院，北京　100875；
2. 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）

摘要：基于全国气象站点、黄河流域及岔巴沟实验小流域的降水观测资料，研究了水文气象站点的空间分布与其生成降水的空间分辨率之间的关系。提出了有效分辨率的概念与计算方法，从观测资料中获得的信息与对资料精度需求的指标中即可确定出最合理的分辨率。在全国区域,采用国家气象局分布的723个观测站点数据，给出一定的精度要求指标后，可以算出有效分辨率分别为24.4km；在全黄河流域，采用760个水文观测站点，可以算出有效分辨率为3.23km，岔巴沟实验流域有效分辨率可以达到0.38km。该成果为基于有限的观测站点生成合理的有效分辨率的降水，提供了关键的技术和科学的依据。

关键词：站点观测数据；降水；空间变异性；有效半径；有效分辨率
中图分类号：P332　　**文献标识码：**A

1　研究背景

气候模式和分布式水文模型的发展对高分辨率的降水产生很大的依赖性[1]。受自然环境和社会经济条件的限制，常规水文气象观测站点十分有限，很多地区处于少(或无)观测资料状态，给气象、水文科学研究带来很大困难。目前，解决上述问题的途径大致分为两种：一是利用遥感技术手段来扩大信息源，但遥感反演数据精度还有待于进一步提高；另一种是基于常规的站点观测资料生成高分辨率的降水数据，常见的方法有各种空间插值方法[2-8]和数据同化方法[9-10]。利用常规有限观测站点观测资料生成的降水数据，其精度和可信度是一个急待解决的难题。有些研究中，由于测站有限，往往用几个站点数据插值生成出成千上万个网格的数据，这些生成出来的数据令人质疑。本文针对观测站点的数量及其空间分布对生成降水的分辨率的影响进行研究，结合国内的水文气象站点资料，在空间尺度上选择全国、黄河流域和岔巴沟实验小流域三种尺度，时间上采用了日、月尺度，提出基于观测站点生成降水的有效分辨率的概念及计算方法，为合理地生成降水数据提供科学依据。

2　研究内容与区域

2.1　研究内容　研究内容包括：(1)降水空间变异性分析；(2)降水有效半径，给出有效半径的计算方法；(3)讨论影响生成数据质量的多项指标，并建立各项指标同空间分辨率的关系；(4)定义有效分辨率，给出通过站点观测数据获得空间分布数据有效分辨率的计算公式。

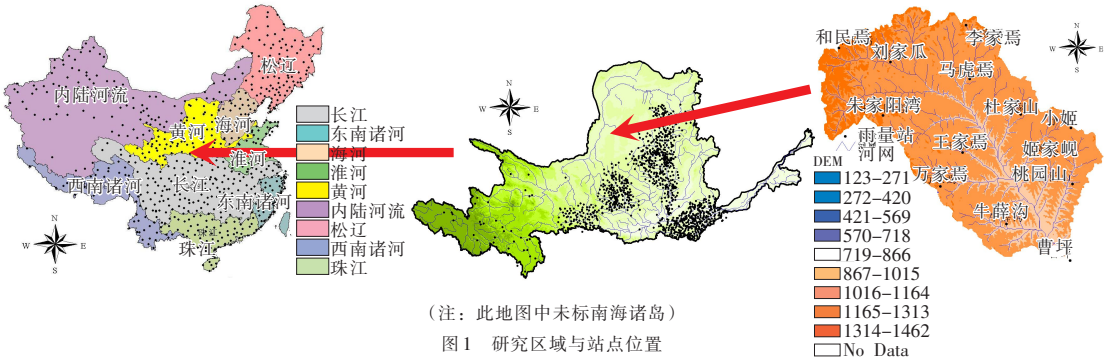
2.2　研究区域　为了研究分辨率与不同站点密度的关系，此处采用了全国、黄河、岔巴沟三级流域

收稿日期：2009-01-12
基金项目：国家自然科学基金重点项目(40730632)；中国科学院陆地水循环及地表过程重点实验室开放基金资助项目(WL2007004)
作者简介：叶爱中(1978-)，男，安徽安庆人，讲师，主要从事气候变化对水文水资源影响研究。E-mail：azye@bnu.edu.cn

不同站点密度的水文气象数据。其中，黄河是我国第二大河，岔巴沟是黄河支流无定

表1　研究区域与降水数据说明

区域	区域面积	站点个数	时间	时间尺度	数据来源
全国	960 / 万 km^2	723	1980–1996	月、日	气象站
黄河	79.5 / 万 km^2	760	1980–1996	日	水文站
岔巴沟	187 / km^2	13	1970–2000	日	水文站



（注：此地图中未标南海诸岛）

图1　研究区域与站点位置

河上一个典型实验流域，位于黄河中游(见图1)。时间尺度采取月与日两个尺度。具体数据见表1。

3　研究方法

3.1　整体思路　有效分辨率是指空间分布数据信息满足一定准则要求的分辨率，即通过观测站点数据插值获得空间分布数据的一个理想的或最高的分辨率。为了获得有效分辨率，需从观测数据的信息与用户的需求两方面分析。在观测数据信息方面，选择了站点密度、站点距离、空间变异性、有效半径及空间插值的交差验证5个指标。在用户对生成数据精度要求方面，选择了雷同性、代表性与

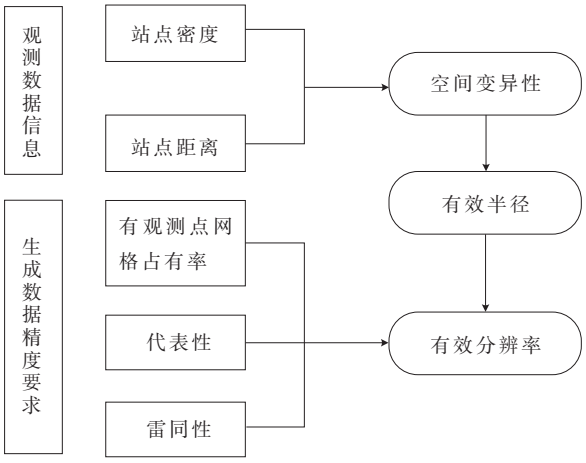


图2　有效分辨率总体研究思路与结构

有观测占有率(生成空间信息网格中至少有一个观测点的网格所占总网格比例)3个指标，见图2。

3.2　站点密度与站点间距离分析　站点的密度指单位流域面积中有观测站点的个数。其计算式为：

$$\rho = N/F \tag{1}$$

式中：F为流域面积(万 km^2)；N为观测站点个数(个)；ρ为站点密度(个/万 km^2)。

通过观测数据获得高空间分辨率的降水栅格数据，关键是插值获得观测站点间的无观测资料区域的数据，所以观测站点间的距离对生成的栅格数据空间分辨率大小有决定性的作用。观测站点一

般空间分布是不均匀的，为了获得整个区域的站点间的距离信息，此处采用站点间距离频率分析的方法。即：首先统计出每个站点和它最近一个站点距离；然后将这些距离按照从小到大进行排序，给出小于每个距离出现的频率，将距离作为横坐标，频率作为纵坐标绘制成曲线，即是频率分析曲线。通过频率曲线即可得到整个区域的站点间距离的整体信息。这些信息可以为分析有效分辨率提供重要指标参考。

3.3　空间变异性分析　降水的空间变异性对生成的栅格数据的分辨率起决定性作用。此处给出对空间变异性分析的量化指标，即空间变异性指标C_v

$$C_v=\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}\left[\left(P_i-P_{\min}\right)/\left(\overline{P}-P_{\min}\right)-1\right]^2}{n-1}} \tag{2}$$

式中：C_v为离差系数，表示不同的均值系列的离散程度，C_v值越大离散程度越大，C_v值越接近0离散程度越小；P_i为每个点的观测值；$P_{\min}$为最小观测降水值；$\overline{P}$为区域平均值；n为研究区域观测站点个数。

如果研究的区域过大，则计算全区域的空间变异性指标不能反映出降水的真实空间变异性。如场次降雨一般都发生在局部区域，而全国同时降水是极少出现的，所以此处提出局部空间变异指标概念。局部空间变异指标是找一个点的最近N个点进行统计，这样能够得到n个C_v值，然后全区域平均得到区域的空间变异指标值。显然，站点越密计算的空间变异指标值将越小。空间变异性指标的计算本文采用站点观测资料计算，所以存在一定的误差，只有在站点足够密的前提下才能够和理论上的空间变异性一致，通过局部计算空间变异性，然后再计算全区域的空间变异性能够有效地降低计算空间变异性误差。

3.4　有效半径R_a　对于特定的降水，计算站点观测值同其周围的点的相关性指标，给定相关性指标

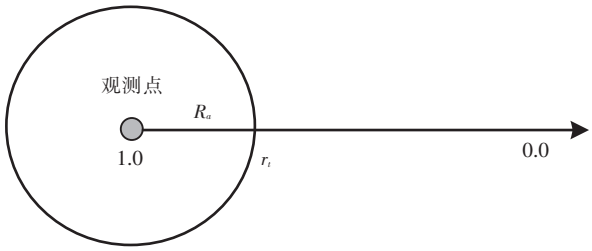


图3　有效半径示意

阈值r_t，相关性指标超过该阈值的最大距离定义为该降水的有效半径(见图3)。

降水一般具有区域性特征，随着距离的增大，则相关性变得较小。显然，同本地自相关系数最大为1.0，无穷远处相关系数趋近于0。

对于有效半径的推求，从理论上可以根据天气系统获得，即采用物理机制的分析即能获得，实际中通过观测资料统计分析获得更简单。

经过统计分析，两点间距离D同两点降水的相关系数r可用一个指数关系来描述，其表达式如下：

$$\begin{cases} r=\alpha\cdot e^{\beta D}, & D>0 \\ r=1, & D=0 \end{cases} \tag{3}$$

或

$$\begin{cases} D=\dfrac{1}{\beta}\cdot\ln\left(\dfrac{r}{\alpha}\right), & 0<r<1 \\ D=0, & r=1 \end{cases} \tag{4}$$

式中：α、β为参数。

则，有效半径为：

$$R_a=\frac{1}{\beta}\cdot\ln\left(\frac{r_t}{\alpha}\right) \tag{5}$$

3.5　有效分辨率R_e函数推求　若通过观测站点获得一定空间分辨率的空间分布信息(见图4)，则有效分辨率必须满足如下几个原则。

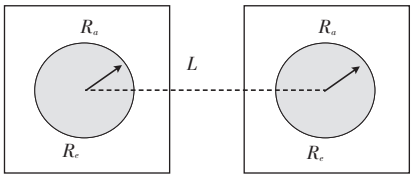


图4　有效分辨率示意

(1)同真值检验(交叉检验)指标(B、R、E)达到一定要求，即资料的可靠性检验。

平衡系数 B = 模拟总量/实测总量；相关系数 $R=\dfrac{\sum(P_c-\overline{P}_c)(P_o-\overline{P}_o)}{\sqrt{\sum(P_c-\overline{P}_c)^2\sum(P_o-\overline{P}_o)^2}}$；效率系数 $E=\left[1-\dfrac{\sum(P_c-P_o)^2}{\sum(P_o-\overline{P}_o)^2}\right]\times100\%$；$P_o$，$P_c$，$\overline{P}_c$，$\overline{P}_o$ 为实测、模拟量和实测、模拟量均值。

(2)生成空间信息网格中至少有一个观测点的网格所占总网格比例不小于 n(%)，n 值由其空间变异性决定，空间变异性越大要求 n 越大。这一准则给获得的分辨率提出了一个约束条件，即：

$$\frac{R_e^2\cdot N}{F}>n\Rightarrow R_e'=\sqrt{\frac{F\cdot n}{N}}<R_e \tag{6}$$

式中：F 为流域面积；N 为观测站点个数；R_e' 为有效分辨率阈值。

式(6)所给的阈值是站点均匀分布情况下的阈值，因为站点分布一般不均匀，实际计算中的阈值要比该准则要求的阈值小，需要根据站网的实际分布确定，式(6)仅供参考。

(3)生成数据高可信度的网格占总网格的比例不低于 m(%)，即生成资料的代表性审查，定义为代表性指标。其主要由观测站点的空间分布决定，若站点分布过于集中，则会出现站点集中区域生成资料可信度高，而部分区域几乎没有观测站点，无站点区域生成的资料可信度低。m 可以根据站点的空间分布与给定的可信度指标确定。

(4)高分辨率的情况下会出现整片区域数据完全一样或者非常接近，原因是观测站点少而给出的分辨率过高，这种完全相同或者相似的网格总数占总网格的比例不高于 s(%)，定义为雷同性指标。获得资料的雷同性是由插值方法、站点密度与获得数据的分辨率决定的，一般分辨率越高，网格尺寸越小，插值结果的雷同性就会越高。如果雷同性过高，获得的高分辨率就失去意义。

通过观测资料采用上述方法获得反应资料信息的指标有：观测站点间距离 L、有效半径 R_a、空间变异性指标 C_v 以及交差检验指标相关系数 E 与效率系数 R。这些观测指标能够反应出所观测的信息精度，所以可以通过这些指标来构造有效分辨率函数，即：

$$R_e=f(L,\ R_a,\ C_v,\ E,\ R) \tag{7}$$

以上各个指标对有效分辨率的影响定性分析如下：(1)空间变异性越大，希望分辨率越高，但资料能得到的分辨率越低，有效分辨率指标越大，即 $C_v\uparrow\Rightarrow R_e\uparrow$；(2)站点间距离越大，能够获得的分辨率越低，有效分辨率指标越大，即 $L\uparrow\Rightarrow R_e\uparrow$；(3)有效半径越大，能够获得的分辨率越高，有效分辨率指标越小，即 $R_a\uparrow\Rightarrow R_e\downarrow$；(4)交叉检验指标越高，能够获得的分辨率越高，有效分辨率指标越小，即 E、$R\uparrow\Rightarrow R_e\downarrow$；(5)在有效半径内，可以认为插值获得的数据都是相对合理的，在站点之间超过有效半径的部分获得的信息存在很大的不确定性，故构造函数中采用了(L-R_a)来计算有效分辨率。

根据以上分析，构造有效分辨率函数为：

$$\begin{cases}R_e=\gamma\dfrac{C_v\cdot(L-R_a)}{E\cdot R},\ L-R_a>1\\ R_e=\gamma\dfrac{C_v\cdot 1}{E\cdot R},\ L-R_a<1\end{cases}\quad 且\ R_e>=\sqrt{\frac{F\cdot n}{N}} \tag{8}$$

式中：γ 为参数。

$$\gamma=f(n,m,s) \tag{9}$$

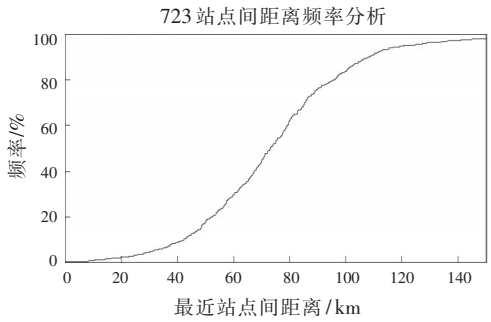
显然，随着 n、m 的增大 γ 增大；随着 s 的增大 γ 减小。所以定义为：

$$\gamma = \frac{n \cdot m}{s} \tag{10}$$

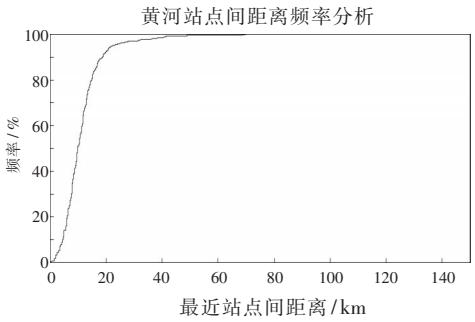
4 结果分析

4.1 最近两点间距离频率分析 降水站点距离频率分析结果见图5。全国区域723站点最近站点的距离80%在95.500km以内（图5（a））。黄河流域760站点90%在18.824km以内（图5（b）），但黄河站点主要集中于黄河中下游区域，该指标主要反映的是有站点区域的信息，对于上游无站点或站点稀少情况下该指标反映的信息不准。岔巴沟流域是实验流域，站点分布相对均匀和密集，站点的最近距离都在5.069km以内（图5（c））。

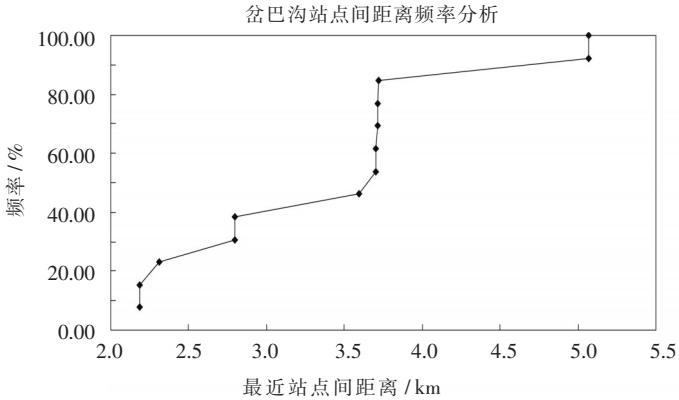
本文所给的三级资料给出了不同的站点密度信息，对于相同的降水、相同的时间尺度，站点密度越密则获得的空间数据分辨率将越高。后文将其与分辨率关系详细分析。



（a）全国气象站点（80%：95.500km）



（b）黄河流域（90%：18.824km）



（c）岔巴沟流域（100%：5.069 km）

图5 降水站点距离频率分析

4.2 空间变异性与交叉验证计算分析 采用观测站点值进行分析，结果见表2。

表2 空间变异性及交叉验证结果

信息要素名	时间分辨率	空间变异性 C_v			站点密度		交叉验证		
		均值	最大	最小	ρ	80%L	E	R	B
岔巴沟降水	日	0.50	2.00	0.00	695.00	3.73	0.915	0.955	0.984
黄河水文降水	日	0.63	2.05	0.00	9.56	14.88	0.772	0.882	1.000
全国降水	月	0.86	1.07	0.69	0.75	95.50	0.727	0.893	1.043
	日	1.17	2.09	0.06	0.75	95.50	0.462	0.710	1.010

注：ρ 单位为：个/万 km^2；80%L 指频率为80%时最近距离，单位为km。

对于空间变异性可以得到如下几个结论：(1)高站点密度区域，局部空间变异性小。原因是此处的空间变异性计算的是区域的空间变异性，站点密度越高越集中，计算的区域将越小，空间变异性也就越小，对应的空间分辨率将越高；(2)时间尺度越大空间变异性越小，说明降水在长时间的累积中将减小空间变异性，如月累积的值空间变异性比日要小。

通过交叉验证检验可以得到如下几个结论：(1)高站点密度区域，交叉验证指标高。站点密度高，站点间距离近，观测的值之间的相关性高，导致其交叉验证指标高，说明直接插值在高站点密度区其可信度要高；(2)时间尺度越大交叉验证指标越高。这一点和其空间变异性出现的原因一致。

4.3 有效半径计算分析 由于岔巴沟流域站点分布密集，有效半径降雨分析选择了岔巴沟流域13个站点与黄河流域760个站点进行分析，时间是1980–1996年日尺度。以岔巴沟流域站点为基准点，寻找其周围200个点计算相关系数，空间距离为0~180km。

13个点同其周围200个相关系数计算结果见表3。

表3 黄河–岔巴沟降雨站距离与日降雨相关分析

站名	经度/(°)	纬度/(°)	高程/m	r–D 相关系数	α	β	R_a		
							r_t=0.85	r_t=0.75	r_t=0.65
曹　坪	109.59	37.39	919	–0.927	0.9215	–0.0062	13.03	33.21	56.30
杜家山	109.57	37.44	1 070	–0.924	0.9147	–0.0064	11.46	31.02	53.38
和民焉	109.48	37.46	1 234	–0.912	0.8695	–0.0063	3.60	23.47	46.18
姬家峴	109.58	37.43	1 090	–0.925	0.9109	–0.0064	10.81	30.37	52.73
李家焉	109.51	37.47	1 111	–0.915	0.8849	–0.0062	6.49	26.68	49.76
刘家瓜	109.51	37.46	1 060	–0.924	0.9012	–0.0065	9.00	28.25	50.27
马虎焉	109.55	37.46	1 040	–0.924	0.9133	–0.0065	11.05	30.31	52.32
牛薛沟	109.56	37.40	1 022	–0.920	0.9211	–0.0068	11.81	30.22	51.26
桃园山	110.00	37.42	1 040	–0.923	0.9046	–0.0065	9.58	28.83	50.85
万家焉	109.53	37.41	1 089	–0.923	0.9278	–0.0066	13.27	32.23	53.92
王家焉	109.53	37.42	1 037	–0.922	0.9221	–0.0065	12.53	31.78	53.80
小　姬	109.59	37.43	1 112	–0.925	0.9097	–0.0065	10.44	29.70	51.71
朱家阳湾	109.51	37.44	1 171	–0.922	0.8957	–0.0065	8.06	27.31	49.33
均　值			1 077	–0.922	0.9075	–0.0065	10.09	29.49	51.68

注：r–D 相关系数是指降水信息相关系数同站点距离的相关系数，R_a是有效半径，r_t是不同站间降水相关系数。

岔巴沟流域相关系数与距离关系为：

$$\begin{cases} r = 0.9075 \cdot e^{-0.00065D}, & D > 0 \\ r = 1, & D = 0 \end{cases} \tag{11}$$

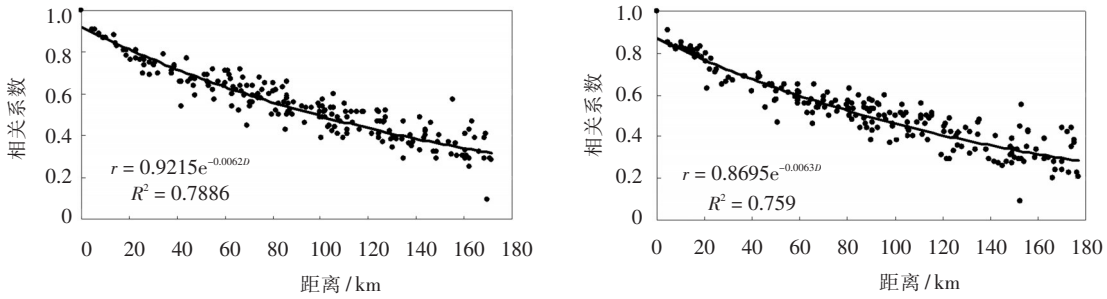
给定相关性指标阈值r_t后即可用下式获得有效半径：

$$R_a = \frac{1}{0.9075} \cdot \ln\left(\frac{r_t}{-0.0065}\right) \tag{12}$$

为了从有限的观测数据中得到高分辨率的空间分布式数据，同时保证生成数据的可靠性，必须选择最优的相关系数r_t。r_t增大保证了生成数据的可靠性，但降低了生成数据的分辨率；反之，r_t取很小的数，有效半径增大，可以获得高分辨率的数据，但数据的可靠性很低。图6给出了黄河岔巴沟流域2个典型站降水相关性与距离关系。

月降水在200km以内相关系数能超过0.8，200km以外相关性不高或者不相关，见图7。

4.4 有效分辨率计算分析 对于岔巴沟流域、黄河流域及全国，统一给出质量控制指标如下：有观测站点网格占总网格比例阈值是1%，生成资料代表性指标80%，雷同性指标是10%。为了简化计算，日降水有效半径的推求采用了岔巴沟流域的降水统计结果，月降水有效半径100km。有效分辨率为式(8)计算的结果与其阈值的最大值(见表4)。由表4可以看出，有效分辨率值很好地反映了降水空间变异性、时间尺度的不同以及对生成的资料精度要求。



(a)曹坪站距离相关系数　　(b)和民焉距离相关系数

图6　距离与相关系数关系

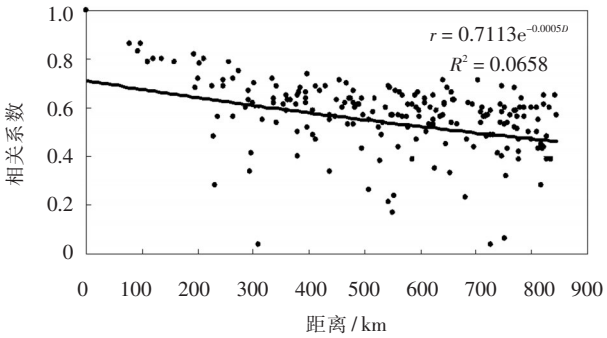


图7　月降水距离与相关系数关系

表4　有效分辨率计算结果

参数意义	岔巴沟日降水	黄河日降水	全国降水	
			日	月
有效分辨率指标R_e/km	0.38	3.23	24.40	11.52
空间变异性指标C_v	0.50	0.63	1.17	0.86
最近两点间距离L/km	4.00	18.82	95.50	95.50
有效半径R_a/km	10	10	10	100
计算有效半径参数α	0.9075	0.9075	0.9075	
计算有效半径参数β	−0.0065	−0.0065	−0.0065	
相关性指标阈值r_t	0.85	0.85	0.85	0.85
交叉检验效率系数E	0.915	0.772	0.462	0.727
交叉检验相关系数R	0.955	0.882	0.710	0.893
计算有效分辨率参数γ	0.08	0.08	0.08	0.80
有观测站点网格占总网格百分比n	0.01	0.01	0.01	0.01
高代表性网格值占总网格百分比m	0.8	0.8	0.8	0.8
雷同性指标s	0.10	0.10	0.10	0.01
有效分辨率阈值R_e'/km	0.38	3.23	11.52	11.52

5　结语

获得高分辨率的历史降水是一个迫切需要解决的难题，问题在于历史观测资料非常有限。本文主要对降水的空间变异性、有效半径等指标进行了分析，给出了降水有效分辨率的计算原则以及有效分辨率的计算公式。最终给出的分辨率不再是一个模糊的固定值，而是根据不同的降水空间变异性、不同的时间尺度及对生成数据精度需求给出的一个分辨率数据集，不同的分辨率具有对应的指标意义。

在推导有效分辨率的过程中，优化了空间变异性指标的计算方法，定义了降水的有效半径，给出了计算有效半径的方法。有效半径、空间变异性指标及站点的密度是确定有效分辨率的关键指标。

实例研究表明，在全国区域，采用国家气象局公布的723个观测站点数据，给出一定的精度要求指标后，可以算出有效分辨率为24.40km。在全黄河流域，采用水文观测760个站点，可以算出有效分辨率为3.23 km，岔巴沟实验流域有效分辨率可以达到0.38 km。

此处给出的有效分辨率公式仅仅是初步的探讨，雷同性指标与代表性指标对有效分辨率的定量影响有待更一步去完善。

参 考 文 献：

[1] Xu Liang, Jianzhong Guo, Ruby Leung L . Assessment of the effects of spatial resolutions on daily water flux simulations [J] . Journal of Hydrology, 2004, 298:287 – 310 .

[2] 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[J] . 地理学报, 2002, 57(1): 47 – 56 .

[3] 李丽娟, 王娟, 等 . 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 .

[4] Dawen Yang, Srikantha Herath, Katumi Musiake . Spatial resolution sensitivity of catchments geomorphologic properties and the effect on hydrological simulation[J] . Hydrological Progresses, 2001(15): 2085 – 2099 .

[5] 王跃山 . 数据同化——它的缘起、含义和主要方法[J] . 海洋预报, 1999, 16(1): 11 – 20 .

[6] 罗乔林 . 数据处理之进展 – 见于气象四维同化问题[J] . 系统工程理论与实践, 1997(9): 98 – 103.

[7] 李新, 程国栋, 等 . 空间内插方法比较[J] . 地球科学进展, 2000(3): 260 – 265 .

[8] 郝永斌, 张玉玲 . 一种四维同化方法的试验研究[J] . 应用气象学报, 1994, 5(3): 319 – 325 .

[9] Mikhail A Semenov . Development of high-resolution UKCIP02-based climate change scenarios in the UK[J] . Agricultural and Forest Meteorology, 2007, 144: 127 – 138 .

[10] Wilks D S . High-resolution spatial interpolation of weather generator parameters using local weighted regressions [Z] . Agric . Forest Meteorol . ,doi:10.1016 / j . agrformet . 2007 .

Study on effective spatial resolution for generating precipitation based on observation data

YE Ai-zhong[1], ZHANG Li-ping[2]

(1. *Beijing Normal University*, *Beijing* 100875, *China*; 2. *Wuhan University*, *Wuhan* 430072, *China*)

Abstract: The relations among the distribution of hydrological & meteorological gauges and the spatial resolution of precipitation were studied. Based on the observed data, a formula for calculating the effective spatial resolution was established, which means that the most accurate spatial resolution can be concluded from the information abstracted from the observed data and the indexes on the demand for the accuracy of the data. It provides the scientific evidences for gaining precipitation with effective spatial resolution from limited observation data.

Key Words: observed data; precipitation; space variation; effective semidiameter; effective spatial resolution

（责任编辑：王成丽）