

椭圆指数函数降水空间插值模型

张升堂¹, 张楷²

(1. 山东科技大学 地球科学与工程学院, 山东 青岛 266590; 2. 陕西省水文水资源勘测局, 西安 710068)

摘要: 如何将基于站点观测的降水数据转化为分布式水文模型所需的分布降水数据, 是分布式水文模型模拟流域水文过程的前提。椭圆指数函数模型具有能够指明降水中心位置及中心降水量的优点, 但与其他空间插值模型比较, 椭圆指数函数模型的插值结果如何尚需进行比较研究。将椭圆指数函数模型与距离倒数权重模型、空间线性插值模型、修正距离倒数模型等降水空间插值模型分别应用于 Santa Catalina 岛 3 场次降水分布。插值结果表明, 椭圆指数函数模型和修正距离倒数模型由于考虑了更多影响因子和降水分布特性, 能较准确反映降水分布。空间线性插值模型由于插值时只考虑相邻三个测点而忽略其他测点对插值结果的影响作用, 因而相比其他三种模型有较大插值误差。修正距离倒数模型考虑了地形高程起伏影响因素, 其模拟精度优于距离倒数方法。椭圆指数函数模型由于具有连续分布函数特性, 能够模拟降水空间连续分布趋势, 因此与其他模型比较也有较高精度。

关键词: 降水; 分布式水文模型; 降水分布模型; 空间插值

中图分类号: P333 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-1683(2015)03-0530-04

Interpolation model of precipitation distribution with elliptic exponential function

ZHANG Sheng tang¹, ZHANG Kai²

(1. College of Earth Science and Engineering, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China;

2. Shaanxi Survey Bureau of Hydrology and Water Resources, Xi'an 710068, China)

Abstract How to transform the observed point precipitation data at the precipitation stations into the distributed data required by the hydrological model is the foundation for the hydrological process simulation of distributed hydrological model. The Elliptic Exponential Function Model (EEFM) has the capability of identifying the precipitation center position and center precipitation amount. Compared with other spatial interpolation models, EEFM interpolation results remain unknown and need further study. In this paper, Inverse Distance Weighting (IDW), Space Linear Interpolation Model (SLIM), Revise Inverse Distance Model (RIDM), and EEFM were applied to characterize the distribution of three precipitation events in the Santa Catalina Island. The interpolation results showed that (1) EEFM and RIDM are able to reflect the precipitation spatial distribution more accurately due to that both methods consider more impact factors and precipitation distribution characteristics; (2) SLIM considers the data from the three adjacent points only and ignores the effects of other points, so its interpolation results show larger errors compared to other models; (3) RIDM takes into account the impact factor of the ups and downs of terrain elevation, and its interpolation accuracy is better than that of IDW; and (4) EEFM is a continuous distribution function and it can simulate the continuously spatial distribution trend of rainfall, therefore it has a higher accuracy compared to other three models.

Key words: precipitation; distributed hydrological model; precipitation distribution model; spatial interpolation

降水流域水文过程的起始, 降水数据的输入是水文模型模拟各种水文过程的前提。传统的集总式水文模型通常只将流域的测站算术平均雨量作为模型的降水输入^[1]。随着计算机技术和 3S 技术的发展, 人们对流域径流预测的精度要求也越来越高, 分布式水文模型因为能反映流域水文过

程的空间变异性而被广泛应用于流域水文过程的模拟。国内外目前研究一般认为基于流域测站观测的点降水数据与分布式水文模型所需求的分布式降水数据不匹配, 导致具有物理基础的分布式水文模型的模拟结果却不一定优于集总式水文模型^[2-3]。因此寻求利用以测站为基础的站点观测降

收稿日期: 2014-04-15 修回日期: 2015-01-16 网络出版时间: 2015-05-13

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20150513.1548.020.html>

基金项目: 国家自然科学基金项目(40971021; 41471025); 山东省自然科学基金项目(ZR2014DM004)

作者简介: 张升堂(1970-), 男, 陕西凤翔人, 副教授, 博士(后), 主要从事水文水资源方面研究。E-mail: zst0077@163.com

水数据,获得空间分布降水数据的有效方法是目前水文水资源研究面临的问题^[4]。一般通过对降水要素空间分布规律的研究,应用空间插值方法获得驱动分布式水文模型所需要的降水输入。虽然目前也有部分地表区域的降水数据来源是基于测雨雷达和卫星遥感,可以实现空间分布数据的直接输出,但总体而言此类区域极少不具代表性,而且数据的精度暂时还不能达到要求,实际应用效果并不理想^[7-8]。因此,对能够充分反映降水空间变异性的分布式降水插值模型的研究越来越受重视。

椭圆指数函数模型是张升堂,康绍忠等建立的数学模型^[9],该模型能够根据降水空间分布趋势模拟降水中心位置以及降水中心的降水量,解决了其他模型的模拟结果必然以某一测站降水量为降水中心的不合理问题,但模型在模拟小流域降水分布时的精度如何,尚需进一步研究,因此本文将椭圆指数函数模型与目前常用距离倒数权重模型、空间线性插值模型、修正距离倒数模型同时应用于 Santa Catalina 岛的 3 场次降水,以判断比较椭圆指数函数模型应用于降水分布插值时的插值精度。

1 方法

1.1 椭圆指数函数降水空间分布模型

椭圆指数函数(Elliptical Exponential Function, EEFM)模型是张升堂,康绍忠等根据如果不受地形影响,天气系统降水的降水量等值线在平面上的分布近似为一组同心椭圆这一假定^[10-11],建立了一种能够模拟天气系统降水分布的降水空间分布模型:

$$p = p_0 e^{-a \sqrt{m(x-x_0)^2 - (y-y_0)^2}}$$

式中: p 为空间位置点 (x, y) 的降水量; p_0 为降水中心降水量; (x_0, y_0) 为降水中心位置; a, m 为待定参数($a, m > 0$)。

通过该模型对场次降水的模拟,能够反应出降水中心位置以及中心位置降水量,模型降水三维降水量分布图以及等值线图见图 1、图 2。

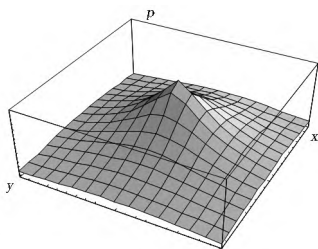


图 1 三维降水量分布图

Fig. 1 Three dimensional precipitation distribution map

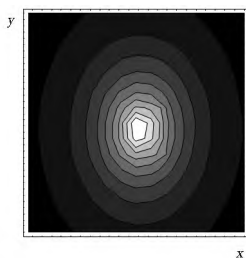


图 2 降水等值线

Fig. 2 Precipitation contour map

1.2 距离倒数加权模型

距离倒数加权(Inverse Distance Weighting, IDW)模型于 1972 年由美国国家气象局提出^[12]。该模型是目前最常用的空间插值模型之一,模型基于相近相似原理,即两个物体空间位置越接近,它们的性质就越相似,差异性就越小;反之,空间距离越远则相似性越小,差异性越大。依此原理距离倒数加权模型利用周边相邻的点采样值,插值估计有限范围空间未知点的值,它以插值点与样本点间的距离为权重进行加权平均,离插值点越近的样本点赋予的权重越大^[13]。

距离倒数加权插值模型的一般形式如下:

$$P = \frac{\sum_{i=1}^n P_i / \sum_{i=1}^n \frac{1}{D_i^b}}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{D_i^b}}$$

式中: P 为插值点估计值; $P_i (i = 1, 2, 3, \dots, N)$ 为实测样本值; n 为参与计算的实测样本数; D_i 为插值点与第 i 个站点间的距离; b 是距离的幂,它显著影响内插结果,幂越高,内插结果越具有平滑的效果。当取 $b = 2$ 时,即为距离倒数平方模型。

1.3 空间线性插值模型

空间线性插值模型(Space Linear Interpolation Model, SLIM)是目前国内较常应用的插值模型^[14-16],该模型是由邻近的 3 个位置点数据生成一个空间插值平面进行线性插值,例如此模型在估计 $A(x, y)$ 点降水量时认为, A 点的降水量由 A 点附近的 3 个雨量站降水数据空间线性插值产生,其数学模型形式如下:

$$S_1 = 0.5 \times \begin{vmatrix} x & y & 1 \\ x_2 & y_2 & 1 \\ x_3 & y_3 & 1 \end{vmatrix} \quad S_2 = 0.5 \times \begin{vmatrix} x_1 & y_1 & 1 \\ x & y & 1 \\ x_3 & y_3 & 1 \end{vmatrix}$$

$$S_3 = 0.5 \times \begin{vmatrix} x_1 & y_1 & 1 \\ x_2 & y_2 & 1 \\ x & y & 1 \end{vmatrix}$$

$$p = (p_1 \times S_1 + p_2 \times S_2 + p_3 \times S_3) / (S_1 + S_2 + S_3)$$

式中: p_1, p_2, p_3 分别为三个邻近观测站点 $(x_1, y_1), (x_2, y_2), (x_3, y_3)$ 实测降水数据; p 为 $A(x, y)$ 的空间线性插值降水量。

1.4 修正距离倒数模型

修正距离倒数模型(Revise Inverse Distance Model, RIDM)考虑到高程变化对降水量的影响作用,因此高程因子的影响也应体现在插值模型中,修正距离倒数插值模型就是一种考虑高程影响的降水三维空间插值模型,该模型利用插值点与观测点空间距离与高程差比值设定权重关系,在此基础上建立插值模型,模型数学表达式如下:

$$\begin{cases} p(x, y, z) = \sum_{i=1}^n \alpha_i p_i \\ \alpha_i = \left(\frac{D_i}{\Delta E_i} \right)^b / \sum_{i=1}^n \left(\frac{D_i}{\Delta E_i} \right)^b \end{cases}$$

式中: ΔE_i 为参证站 i 与插值位置点 (x, y, z) 的地表高程差; D_i 为插值位置点 (x, y, z) 到第 i 站位置点的空间直线距离; b 为权重指数; p_i 为参证站 i 的实测降水数据; $p(x, y, z)$ 为插值位置点 (x, y, z) 降水量。

2 模型应用比较

2.1 应用区域概况

Santa Catalina 岛位于北纬 $33^\circ 30'$, 西经 $118^\circ 13'$, 是靠近

美国加利福尼亚州海岸附近的一个岩石岛屿,该岛屿长约 35 km,最大宽度为 13 km。岛上的最高点为 Orizaba 约为 639 m。岛屿的降水主要集中在 11 月份到来年 3 月份,年平均降水量约为 3 800 mm。选取 Santa Catalina 岛作为研究应用区域,一是因为这一岛面积不大且有 7 个国家级降水观测站点

是各种降水空间插值模型的理想应用区域,其次 Santa Catalina 岛具有详实的公开降水记录资料,并提供网址供查阅 <http://www.wrcc.dri.edu/CLIMATE/EDATA.html>,资料可靠性高。本文依据小、中、大降水场次兼顾的原则应用了 2008 年的 3 个场次降水数据,见表 1。

表 1 测站位置及 2008 年 3 场次降水量

Tab. 1 Location of precipitation stations and amounts of three rainfall events in 2008

测站	纬度	经度	高程/m	降水量/mm		
				2008-11-2	2008-4-2	2008-1-27
Cactus Peak	33° 20' 09"	118° 26' 10"	441.96	2.80	9.65	20.07
Dakin Peak	33° 21' 02"	118° 21' 07"	480.06	1.27	7.87	12.95
Hayfield	33° 20' 55"	118° 25' 28"	212.75	2.54	9.40	18.80
Parsons Landing	33° 28' 03"	118° 32' 49"	122.83	0.51	4.32	27.69
Silver Peak Trail	33° 26' 46"	118° 32' 35"	542.5	1.78	10.41	29.21
Wild Boar Gully	33° 19' 28"	118° 26' 21"	221.89	2.29	7.87	19.30
Whitleys Peak	33° 22' 21"	118° 22' 33"	441.96	0.25	6.60	21.59

2.2 应用结果

随机选取 Hayfield 站点的观测数据为校验点,利用其他 6 个观测站点的实测数据作为基础数据使用椭圆指数函数模型、距离倒数权重模型、空间线性插值模型、修正距离权重模型四种模型分别对 Santa Catalina 岛 2008 年 1 月 27 日、4 月 2 日、11 月 2 日的 3 场降水 Hayfield 站点的降水量进行空

间插值估计。

在应用椭圆指数函数模型时,编写 MatLab 程序,借助 MatLab 软件的非线性拟合功能拟合模型中的几个待定参数,结果列于表 2。距离倒数权重模型、空间线性插值模型、修正距离权重模型针对这 3 场降水的插值结果见表 3。

表 2 EEFM 对 Hayfield 站降水插值结果

Tab. 2 EEFM estimated rainfall results at the Hayfield station

降水场次	模型参数拟合结果					Hayfield 站降水量/mm		
	p_0	n	m	x_0	y_0	估值	观测	相对误差
2008-11-02	1.112 7	0.380 7	2.255 5	21.788 0	31.802 7	2.21	2.54	-0.012 8
2008-04-02	2.440 2	0.144 2	8.972 8	22.638 5	36.653 8	9.43	9.40	+0.001 3
2008-01-27	1.150 0	0.045 3	0.864 0	26.746 7	32.372 8	20.19	18.80	+0.054 8

注:表中 x_0, y_0 为降水中心的经纬度,由于岛屿各测站位置经纬度差别在分秒级别,表中以分为单位,未列出整数度。

表 3 IDW, SLIM 和 RIDIM 三种模型对 Hayfield 站降水插值结果

Tab. 3 IDW, SLIM, and RIDIM estimated rainfall results at the Hayfield station

降水场次	观测值/mm	IDW		SLIM		RIDIM	
		估值/mm	相对误差	估值/mm	相对误差	估值/mm	相对误差
2008-11-02	2.54	2.46	-0.030 0	2.69	0.060 0	2.51	-0.010 0
2008-04-02	9.40	8.94	-0.048 6	10.21	0.086 5	9.37	-0.002 7
2008-01-27	18.80	19.86	0.056 8	20.78	0.105 4	20.04	0.066 2

2.3 应用结果分析

首先,椭圆指数函数模型能估计降水中心位置而且还能估计降水中心的降水量,这是其他插值模型所不具备的特征,模型估计值随位置点远离降水中心而减少符合降水量分布自然现象,但其对降水中心位置的估计缺乏资料验证检验,因为以站点为基础的观测很难实测到降水中心,因而对模型的验证有待雷达测雨技术或卫星测雨技术提供的雨量资料进行验证。

比较四种模型插值相对误差,并列于图 3,可以看出空间线性插值在所有三场次降水插值中,是四种模型中相对误差最大的,出现这种现象的原因应该是由空间线性插值模型的特点决定的。首先,空间线性插值模型在插值时使用插值位

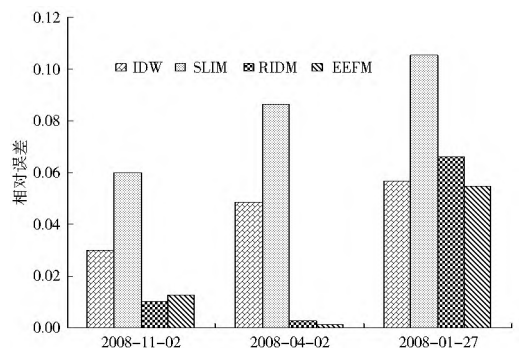


图 3 四种插值模型插值误差比较

Fig. 3 Comparison of interpolation errors of the four interpolation models

置点附近的三个点降水数据组成插值平面,对三个点以外的其他观测点数据不予考虑,即使用数据数量少,所能体现的降水分布变化信息少,因而数据的代表性差,模型的插值结果不及其他插值模型。另外,空间线性插值模型利用三个相邻点数据组成的插值平面,在整个研究区域模拟的实际是一组折面组合,而实际降水分布理论上是一连续曲面,空间线性插值模型模拟与实际的降水分布有很大区别,这些是空间线性插值相对误差大于其他三种模型的主要原因。

比较距离倒数权重模型和修正距离倒数模型,修正距离倒数模型的相对误差总体上小于距离倒数模型,修正距离倒数模型考虑了高程对降水的影响,如果降水发生在理想水平下垫面,修正距离倒数模型就是距离倒数权重模型,实际上距离倒数权重模型是修正距离倒数模型忽略高程影响的简化形式。考虑高程因子影响作用是修正距离倒数权重模型误差小于距离倒数权重模型的重要原因。

通过3场次的降水插值结果看出,椭圆指数函数模型和修正距离倒数模型优于空间线性插值模型和距离倒数权重模型,笔者认为这是因为椭圆指数函数模型和修正距离倒数模型相对而言更多地考虑了降水的影响因子和降水分布特征性质,更加符合自然界降水现象,因而总体误差较小,但这一结论进一步的证实有待统计更多场次的降水插值结果。

椭圆指数函数模型和修正距离倒数模型两者的插值结果理想,相对误差都较小,是两种理想的降水空间插值模型,如果比较两者之间的平均误差,椭圆指数函数模型对3场次降水插值的平均误差2.30%,修正距离倒数模型平均误差2.63%,椭圆指数函数模型要稍占优势,但仅凭3场次降水插值结果尚不足以形成定论,这两种模型插值结果的优劣比较依然有待更多场次的降水插值结果统计。

3 结论

椭圆指数函数模型是目前一种新兴降水空间分布插值模型,但其插值结果有待进一步比较研究,本文利用距离倒数权重模型、空间线性插值模型、修正距离倒数模型等三种目前具有代表性的空间插值模型与椭圆指数函数模型进行比较。借助 Santa Catalina 岛7测站同步观测的3场次降水数据进行插值比较,得到以下相关结论。

(1) 距离倒数权重模型插值精度优于空间线性插值模型但劣于修正距离倒数模型,它是修正距离倒数模型忽略高程变化因素的简化;

(2) 空间线性插值模型利用三个点组成插值平面进行插值,利用数据信息相对较少,而且平面插值不符合实际降水分布呈曲面连续分布的特点,因而插值误差较大;

(3) 椭圆指数函数模型和修正距离倒数模型更多地考虑了降水的影响因子和降水分布特征性质,因而更符合自然界降水现象,所以总体误差较小。

参考文献(References):

[1] 王中根,刘昌明,左其亨,等.基于DEM的分布式水文模型的构建方法[J].地理科学进展,2002,21(5):430-439(WANG Zhonggen, LIU Changming, ZUO Qiting, et al. Methods of constructing distributed hydrological model based on DEM[J].

Progress in Geography, 2002, 21(5): 430-439(in Chinese))

- [2] 文康,金管生.地表径流过程的数学模拟[M].北京:水利电力出版社,1991:1-24(WEN Kang, JIN Guansheng. Mathematical modeling of surface runoff[M]. Beijing: Water Power Press, 1991: 1-24(in Chinese))
- [3] 刘昌明,郑红星,王中根.流域水循环分布式模拟[M].郑州:黄河水利出版社,2006(LIU Changming, ZHENG Hongguo, WANG Zhonggen. Distributed simulation of the hydrological cycle[M]. Zhengzhou: Yellow River Conservancy Press, 2006(in Chinese))
- [4] 王宗敏,张杰,赵红领,等.城市暴雨内涝计算中降雨插值算法的选取[J].人民黄河,2012,34(8):24-26(WANG Zongmin, ZHANG Jie, ZHAO Hongling, et al. Selection of the interpolations of rainfall for calculating the water logging disasters caused by the urban storms[J]. Yellow River, 2012, 34(8): 24-26(in Chinese))
- [5] 王喜峰,周祖昊,贾仰文,等.几何插值法在大尺度长系列降雨插值中的比较和改进[J].水电能源科学,2010,28(12):1-3(WANG Xifeng, ZHOU Zuhao, JIA Yangwen, et al. Comparison and improvement of geometry interpolation methods in rainfall interpolation with large scale long series data[J]. Water Resources and Power, 2010, 28(12): 1-3(in Chinese))
- [6] WANG Guangyue, LIU Yonghui, WANG Xirhua. Experimental investigation of hydrodynamic characteristics of overland flow with geocell[J]. Journal of Hydrodynamics, Ser. B, 2012, 24(5): 737-743
- [7] 许继军,杨大文,蔡治国,等.基于分布式水文模拟的三峡区间洪水预报模型构建及验证[J].水文,2008,28(1):32-37(XU Jijun, YANG Dawen, CAI Zhiguo. Flood forecasting in the Three-Gorge Reach based on a distributed hydrological model: Modeling and calibration[J]. Journal of China Hydrology, 2008, 28(1): 32-37(in Chinese))
- [8] 许继军,蔡治国,刘志武,等.基于分布式水文模拟的三峡区间洪水预报雷达测雨应用[J].水文,2008,28(2):18-22(XU Jijun, CAI Zhiguo, LIU Zhiwu. Flood forecasting in the Three-Gorge reach based on a distributed hydrological model: Application of radar rainfall data[J]. Journal of China Hydrology, 2008, 28(2): 18-22(in Chinese))
- [9] 张升堂,康绍忠,刘音.新型降水分布数学模型研究及其应用[J].应用生态学报,2005,3(16):556-557(ZHANG Shengtang, KANG Shaoshong, LIU Yin. A new precipitation distribution hydrological model and its application[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2005, 3(16): 556-557(in Chinese))
- [10] 王国安.可能最大暴雨和洪水计算原理与方法[M].北京:中国水利水电出版社,郑州:黄河水利出版社,1999:26-28(WANG Guoan. Principles and methods of PMP/PMF calculations[M]. Beijing: China Water Power Press, Zhengzhou: Yellow River Conservancy Press, 1999: 26-28(in Chinese))
- [11] [美]梅德门特编,张建云,李纪生等译.水文手册[M].北京:科学出版社,2002:82-87(ZHANG Jianyun, LI Jisheng, Hydrologic Manual[M]. Beijing: Science Press, 2002: 82-87(in Chinese))
- [12] Ray K. Linsley, Joseph B. Franzini. Water Resources Engineering[M]. New York: McGraw-Hill, 1979: 11-22

(下转第542页)

参考文献(References):

- [1] Doerflinger N J, Eannin P Y, Zwahlen F. Water vulnerability assessment in karst environments a new method of defining protection areas using a multi attribute approach and GIS tools [J]. *Environmental Geology*, 1999, 39(2): 165-176.
- [2] 张保祥. 黄水河流域地下水脆弱性与水源保护区划分研究[D]. 北京: 中国地质大学, 2006. (ZHANG Baoxiang. Groundwater vulnerability assessment and wellhead protection area delineation in Huangshuihe River Basin[D]. Beijing: China University of Geosciences, 2006. (in Chinese))
- [3] J M Vas, B Andreo, M J Perles, et al. Proposed method for groundwater vulnerability mapping in carbonate(karstic) aquifers: the COP method Application in two pilot sites in Southern Spain[J]. *Hydrogeology Journal*, 2006, 14: 912-925.
- [4] 孙才志, 潘俊. 地下水脆弱性的概念、评价方法与研究前景[J]. *水科学进展*, 1999, 10(4): 444-449. (SUN Cai zhi, PAN Jun. Concept and assessment of groundwater vulnerability and its future prospect[J]. *Advances in Water Science*, 1999, 10(4): 444-449. (in Chinese))
- [5] 王国利, 周惠成, 杨庆. 基于 DRASTIC 的地下水易污染性多目标模糊模式识别模型[J]. *水科学进展*, 2000, 11(2): 174-179. (WANG Guoli, ZHOU Hui cheng, YANG Qing. Study on multi objective fuzzy pattern recognition model of groundwater vulnerability based on DRASTIC [J]. *Advances in Water Science*, 2000, 11(2): 174-179. (in Chinese))
- [6] 姜志群, 朱元牲. 地下水污染敏感性评价中 DRASTIC 法的应用[J]. *河海大学学报*, 2001, 29(2): 100-103. (JIANG Zhiquan, ZHU Yuan sheng. Evaluating regional groundwater pollution potential with DRASTIC for Daqinghe Basin[J]. *Journal of Hohai University*, 2001, 29(2): 100-103. (in Chinese))
- [7] 李剑颖. 官厅水库流域水资源脆弱性评价研究[D]. 北京: 北京师范大学, 2007. (LI Jianying. Study on vulnerability assessment of water resources of Guanting Reservoir Basin[D]. Beijing: Beijing Normal University, 2007.)
- [8] 张昕, 蒋晓东, 张龙. 地下水脆弱性评价方法与研究进展[J]. *地质与资源*, 2010, 19(3): 253-258. (ZHANG Xing, JIANG Xiaodong, ZHANG Long. Methods and research progress of groundwater vulnerability assessment [J]. *Geology and Resources*, 2010, 19(3): 253-258. (in Chinese))
- [9] 刘绿柳. 水资源脆弱性及其定量评价[J]. *水土保持通报*, 2002, 22(2): 41-44. (LIU Luli. Concept and quantitative assessment of vulnerability of water resource [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2002, 22(2): 41-44. (in Chinese))
- [10] 高赞东. 基于 GIS 的济南岩溶泉域地下水含水层脆弱性评价[D]. 北京: 中国地质大学, 2007. (GAO Zhandong. GIS-based vulnerability assessment for Jinan karst spring basin groundwater aquifer [D]. Beijing: China University of Geosciences, 2007. (in Chinese))
- [11] 刘海娇, 仕玉治, 范明元, 等. 基于 GIS 的黄河三角洲水资源脆弱性评价[J]. *水资源保护*, 2012, 28(1): 34-37. (LIU Haijiao, SHI Yuzhi, FAN Mingyuan, et al. Water resources vulnerability assessment in Yellow River Delta based on GIS [J]. *Water Resources Protection*, 2012, 28(1): 34-37. (in Chinese))
- [12] 张强. 岩溶区地下水脆弱性风险性评价以重庆市青木关岩溶槽谷为例[D]. 重庆: 西南大学, 2009. (ZHANG Qiang. Vulnerability and contamination risk assessment of karst groundwater Qingmuguan karst valley of Chongqing as an example [D]. Chongqing: Southwest University, 2009. (in Chinese))
- [13] Nico Goldscheider. Karst groundwater vulnerability mapping: application of a new method in the Swabian Alb, Germany[J]. *Hydrogeology Journal*, 2005, 13(4): 555-564.
- [14] 赵玉国. 基于 GIS 的岩溶地下水脆弱性评价 - 以重庆市老龙洞地下河流域为例[D]. 重庆: 西南大学, 2011. (ZHAO Yugu. Vulnerability assessment of karst groundwater base on GIS A case study of Laolongdong underground river basin, Chongqing [D]. Chongqing: Southwest University, 2011. (in Chinese))
- [15] zwahlen F. Vulnerability and risk mapping for the protection of carbonate(Karst) Aquifers[M]. *European Approach COST Action 620, Final Report*, 2003: 163-171.
- [16] 邢立亭, 吕华, 高赞东, 等. 岩溶含水层脆弱性评价的 COP 法及其应用[J]. *有色金属*, 2009, 61(3): 139-142. (XING Liting, LV Hua, GAO Zhandong, et al. Evaluation of groundwater vulnerability in karst areas using COP method [J]. *Nonferrous Metals*, 2009, 61(3): 139-142. (in Chinese))
- [17] Nata a Ravbar, Nico Goldscheider. Proposed methodology of vulnerability and contamination risk mapping for the protection of karst aquifers in Slovenia [J]. *Acta carsologica*, 2007, 36(3): 397-411.
- [18] 山东省土壤肥料工作站. 山东土壤[M]. 北京: 中国农业出版社, 1994. (Soil and fertilizer station of Shandong province. Soil of Shandong Province [M]. Beijing: China Agriculture Press, 1994. (in Chinese))
- [13] 李新, 陈国栋, 卢玲. 空间插值方法比较[J]. *地球科学进展*, 2000, 15(3): 260-265 (LI Xin, CHEN Guodong, LU Ling. Comparison of spatial interpolation methods [J]. *Advance in Earth Sciences*, 2000, 15(3): 260-265 (in Chinese))
- [14] 王贵作, 任立良, 王斌. 基于栅格的分布式流域水文模型的构建与应用[J]. *水电能源科学*, 2008, 26(6): 17-20 (WANG Guizuo, REN Liliang, WANG Bin. Grid based distributed watershed hydrological modelling and its application in cold and arid regions [J]. *Water Resources and Power*, 2008, 26(6): 17-20 (in Chinese))
- [15] 左其亭, 王中根. 现代水文学[M]. 郑州: 黄河水利出版社, 2002: 2-3 (ZUO Qiting, WANG Zhonggen. *Modern hydrology* [M]. Zhengzhou: Yellow River Conservancy Press, 2002: 2-3 (in Chinese))
- [16] ZHANG Sheng tang, Storm water utilization as an environmental friendly method to alleviate urban water resources crisis: Taking Qingdao as an example, *IEEE*, 2011, 1722-1725.

(上接第 533 页)