DOI:10.19789/j.1004-9398.2015.06.018

基于马尔科夫和信息熵的北京平原地面沉降空间结构演化分析

颉晋荣 宫辉力 陈蓓蓓 朱 峰
(首都师范大学资源环境与旅游学院,北京 100048)

摘 要

地面沉降尤其是不均匀地面沉降严重影响了城市建设以及经济发展,探讨地面沉降的空间结构演化对于地面沉降防治具有重要意义. 本文基于遥感和 GIS 技术,采用马尔科夫以及信息熵理论分析了北京平原地面沉降结构的演化特征,结果表明: 北京平原地面沉降将在 2025 年达到稳定,其中沉降严重区所占面积达 84%; 严重沉降区的主要来源是轻度沉降区和中度沉降区的转化,其转移的信息熵分别为 1.049 9 bit 和 1.162 6 bit; 北京平原区信息熵在稳定状态时有所下降,约为 0.772 8 bit,说明其同质性有所增加,系统的稳定性得到提高.

关键词: 地面沉降,PS-InSAR,马尔科夫,信息熵,结构演化.
中图分类号: P237

0 引 言

地面沉降是一种地面标高缓慢降低的环境地质现象,其影响因素是多方面的,主要包括地下水超采,城市动静载荷以及自然因素的影响[1]. 由于地面沉降造成的地质灾害会带来巨大的社会经济损失,国内外学者在地面沉降监测,成因机理,数值模拟及预测等方面进行了大量研究,并取得了较大进展[2]. 其中,大区域的地面沉降监测是目前的研究热点,尤其随着微波技术的发展,利用雷达干涉监测地面沉降理论上可以达到毫米级精度[3]. 目前,雷达干涉测量从 InSAR,D-InSAR 逐渐发展到 PS-InSAR 以及小基线干涉测量等先进监测技术[4-8],其数据处理精度越来越高,适用性也越来越强.

本文利用 2004 ~ 2009 年的 24 景雷达数据,采用永久散射体干涉技术(PS-InSAR)获取了北京市平原区年沉降量. 在此基础上,利用 GIS 技术分析了地面沉降变化的空间分布,并从随机场的角度探讨了北京市地面沉降的稳定状态,通过计算地面沉降信息熵,分析了地面沉降的系统性特征.

1 研究区概况

北京平原由永定河,潮白河,温榆河以及洵河等河流携带泥沙沉积而成,是典型的山前冲洪积平原. 地势由西北向东南缓倾,地面坡降 1‰ ~ 3‰,地面高程多在 100 ~ 200 m 之间. 中生代末以来,平原区多处于沉降运动中; 从第四纪开始,平原区新构造运动强烈,大幅度的沉降运动曾使平原区一度遭受海侵,形成海湾. 在平原区下部,由于沉降幅度的差异,形成“两凹一隆”的格局和一系列断裂构造. 20 世纪 60 年代以来,由于大量开采地下水,北京市地面沉降呈现加速发展的趋势,目前已经形成了 5 个较大的地面沉降区,最大累计沉降量达 1 163 mm,严重的地面沉降区域年沉降速率达 100 多毫米[9]. 部分地区由于地面沉降出现了楼房墙壁开裂,地面下沉以及地下管道破坏等现象[10].

2 数据来源及处理

本次研究主要采用 ENVISAT 卫星提供的数据,包括 2004 ~ 2009 年的 24 景覆盖北京市平原区的 ASAR 影像,其工作波段为 C 波段,波长和频率分别是 5.6 cm 和 5.3 GHz,极化方式为 VV 极化. ASAR 影像采用 GAMMA SAR 软件进行预处理,后期的干涉处理采用 DORIS 以及 Stam-PS 开源软件进行,其中,PS-InSAR 处理过程所需要的精确轨道数据来源于欧空局,影像的垂直基线为 -685 m 至 987 m,时间基线是 -710 d 到 1 190 d(图 1),主影像为 2005 年 12 月 14 日的 ASAR 影像,经过 PS-InSAR 处理后

收稿日期: 2014-03-04

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

获得的 PS 点密度为 55 个/km^2. 利用获取的永久散射体点进行空间插值,分辨率为 30 m,并根据不同沉降量共划分为 4 类(表 1).

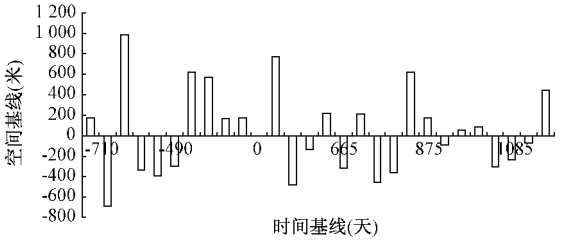


图 1 PS-InSAR 处理时空基线

3 模型与方法

3.1 马尔科夫理论

马尔科夫理论是苏联数学家马尔科夫提出的一种统计模型,其理论的重点包括状态的划分以及状态转移和转移概率计算[11]. 根据 PS-InSAR 处理结果,北京市地面沉降被划分 4 种状态[12],分别表示轻度沉降(Ⅰ),中度沉降(Ⅱ),严重沉降(Ⅲ),不沉降(Ⅳ),利用 ArcMap 平台可以获取各类沉降状态的面积以及转移量,以 P 表示状态转移概率矩阵:

$$P = \begin{Bmatrix} p_{11} & p_{12} & p_{13} & p_{14} \\ p_{21} & p_{22} & p_{23} & p_{24} \\ p_{31} & p_{32} & p_{33} & p_{34} \\ p_{41} & p_{42} & p_{43} & p_{44} \end{Bmatrix} \quad (1)$$

其中 p_{ij} 表示沉降状态 i 转移为沉降状态 j 的概率,其值等于状态 i 转化为状态 j 的面积占状态 i 转移面积和的比率. 矩阵 P 被称为一步转移概率矩阵,在此基础上,可以得到 n 步状态转移概率矩阵,其计算公式为 P 自乘 $n-1$ 次. 当状态转移概率矩阵值保持不变时,可以认为地面沉降已经达到稳定状态.

3.2 信息熵计算

信息熵是信息论创始人萨蒙于 1984 年提出的概念,将熵作为一个随机事件的不确定性或信息量的度量,通过对系统状态进行随机抽样,得到其概率分布特征,在此基础上得到信息熵从而获取系统的判断[13]. 本次研究将北京平原地面沉降作为一个系统,探讨其不同时间段上的系统特征. 信息熵的计算如公式(2)所示:

$$S = -\sum_{i=1}^{s} p_i \log_2 p_i \quad (2)$$

P_i 表示地面沉降状态 i 的面积占总面积的比例,其值越大,说明信息量越丰富,也就说明区域地面沉降的差异性较大,其值越小,说明地面沉降的一致性较好.

4 结果分析

4.1 地面沉降空间分布特征

图 2 是利用 PS-InSAR 处理获得北京平原区 2004 年~2009 年地面累积沉降量,其中负值表示沉降. 图 2 表明,该地区的地面沉降具有明显的加重趋势,2004 年,最大累积沉降量只有 77.52 mm,但到 2009 年,该值达到了 154.49 mm. 发生沉降的地区也逐步扩大,2004 年发生地面沉降的区域主要集中在平原区的西北和东南,其总面积约为 2 524.83 km^2,2009 年,发生地面沉降的面积扩大到 4 846.21 km^2,其分布区几乎覆盖了整个研究区. 为了进一步分析北京平原地面沉降的空间特征,利用各年累积沉降量减去上年的累积沉降量即可得到每年的沉降值. 图 3 是 2005 年及 2009 年的沉降量分类图,分类标准见表 2. 从图上看,2008 年的严重沉降区面积相对 2005 年有所增加,且具有联成一片的趋势. 经统计,2005 年严重沉降区面积只有 38.93 km^2,但到 2009 年,严重沉降区面积扩大到 155.02 km^2,而不发生沉降的面积从 2005 年的 443.09 km^2 缩小到 2009 年的 353.15 km^2,总体上,北京平原地面沉降严重区和中等沉降区面积有所增加,而轻度沉降和不沉降区域面积则大大减少(表 1).

表 1 地面沉降状态划分及其面积统计

地面沉降(mm)	类别	2005(km^2)	2009(km^2)
>0	不沉降	38.93	155.02
-30~0	轻度沉降	320.96	629.77
-50~-30	中度沉降	4 545.12	4 210.17
<-50	严重沉降	443.09	353.15

4.2 地面沉降空间结构演化特征

利用 2005 和 2009 年北京平原地面沉降的分类图进行空间结构演化特征的分析. 根据马尔科夫理论,首先需要建立地面沉降不同状态的转移概率矩阵,利用 ArcMap 提取各年各沉降状态转移面积,并获取面积比,如表 2 和表 3 所示.

表 2 北京平原地面沉降转移量(2005 年~2009 年)

	轻度沉降	中度沉降	严重沉降	不沉降
轻度沉降	0.69	10.14	27.54	0.56
中度沉降	5.45	47.43	236.37	31.72
严重沉降	11.25	118.65	3 833.90	581.32
不沉降	1.25	26.56	382.30	32.99

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

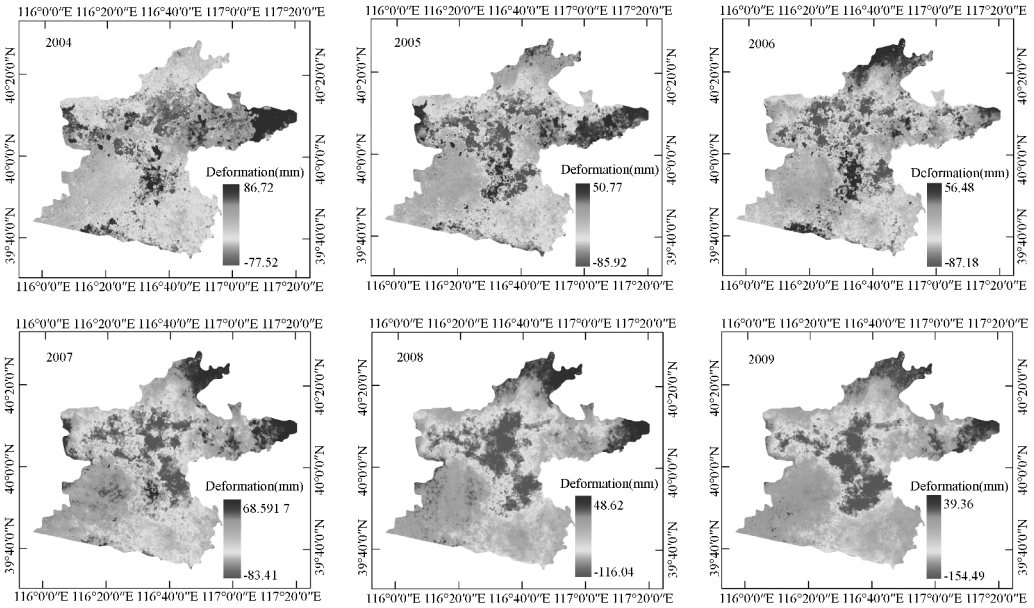


图 2　2004 ~ 2009 年北京平原地面沉降空间分布

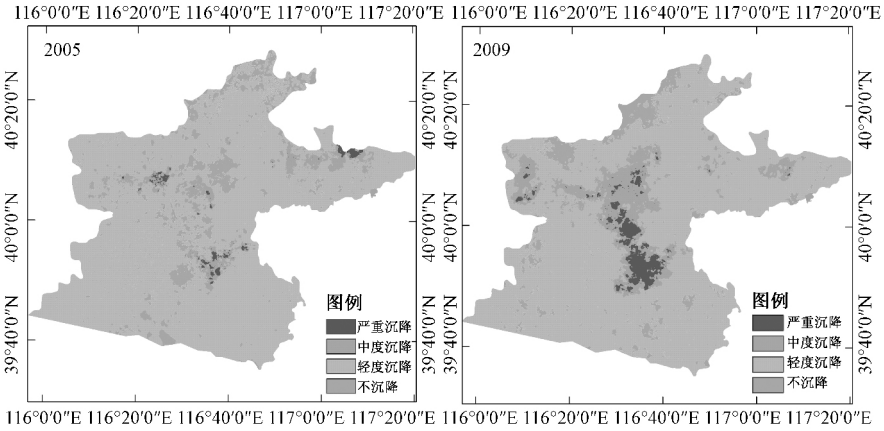


图 3　2005 和 2009 年地面沉降分类图

表 3　北京平原地面沉降面积转移概率矩阵表(2005 年 ~ 2009 年)

	轻度沉降	中度沉降	严重沉降	不沉降
轻度沉降	0. 017 7	0. 260 5	0. 707 4	0. 014 4
中度沉降	0. 017 0	0. 147 8	0. 736 4	0. 098 8
严重沉降	0. 002 5	0. 026 1	0. 843 5	0. 127 9
不沉降	0. 002 8	0. 059 9	0. 862 8	0. 074 4

表 3 和表 4 说明,不同沉降状态的转移量存在着较大差别. 其中,从非严重沉降状态转化为严重沉降状态的面积约为 646. 2 km^2,从不沉降状态转化为各类沉降状态的面积约为 410. 11 km^2,转变为不沉降状态的沉降区面积约为 613. 6 km^2. 严重沉降以及不沉降区域的内部转化面积较大,中度沉降区主要转化方向为严重沉降区. 这说明,北京平原存在着较大的差异性沉降以及转移. 利用表 4 的概率表在 Matlab 中进行运算,以获取地面沉降稳定时各类沉降的概率,迭代运行 5 次后,转移概率矩阵中的值不再发生变化,此时认为按照当前的演化进度,北京平原地面沉降的空间结构将在 20 年(4 × 5)后达到稳定(2025 年). 稳定结构时各沉降状态比率如表 4 所示:

表 4　稳定状态下北京平原地面沉降状态概率(%)

	轻度沉降	中度沉降	严重沉降	不沉降
轻度沉降	0. 3	3. 5	84. 0	12. 0
中度沉降	0. 3	3. 5	84. 0	12. 0
严重沉降	0. 3	3. 5	84. 0	12. 0
不沉降	0. 3	3. 5	84. 0	12. 0

表 4 显示,当北京平原地面沉降达到稳定结构时,其严重沉降区面积巨大,占北京平原面积的

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

84%左右,而不沉降区域面积约为 12%,其他沉降状态的区域面积较少,一共只有 3.8%.

4.3 地面沉降信息熵变化

不同地面沉降状态出现的可能性可以认为是信息熵中事件发生的概率,根据信息熵理论[14],当地面沉降类型只有一种时,其熵值最小(0);当地面沉降类型齐全,且满足均匀分布时,其熵值最大(1).地面沉降尤其是不均匀地面沉降对城市建设以及经济发展影响较大,因此熵值越小越好.根据公式 2,可以分别获取各年的信息熵(表 5)以及转移信息熵(表 6).

表 5 各年信息熵

	轻度沉降	中度沉降	严重沉降	不沉降	信息熵
2005	0.007 278	0.060 014	0.849 857	0.082 851	0.792 4
2009	0.028 986	0.117 755	0.787 226	0.066 033	1.042 1
2025	0.003	0.035	0.84	0.12	0.772 8

从表 5 看,2009 年时信息熵最大,这是因为 2009 年不同地面沉降状态都占有一定比例,其异质性强,不均匀沉降的程度也较深,到 2025 年,不同状态的地面沉降比例差别较大,其中严重沉降区面积比例达 84%,而其他状态的地面沉降面积较少,这造成了其均匀程度的增加.

结合表 3 和表 4 可以得到不同状态地面沉降的转移信息熵[15].转移信息熵可以说明不同状态地面沉降对稳定结构的信息贡献量,计算结果如表 6 所示。

表 6 转移信息熵

	轻度沉降	中度沉降	严重沉降	不沉降	转移信息熵
轻度沉降	0.017 7	0.260 5	0.707 4	0.014 4	1.049 9
中度沉降	0.017 0	0.147 8	0.736 4	0.098 8	1.162 6
严重沉降	0.002 5	0.026 1	0.843 5	0.127 9	0.745 5
不沉降	0.002 8	0.059 9	0.862 8	0.074 4	0.729 6

转移信息熵计算结果显示,中度沉降的贡献量最大,转系的信息熵为 1.162 6 bit,约占转移信息熵总和的 31.5%,其次是轻度沉降的信息熵转移,为 1.049 9 bit.这说明稳定状态时所蕴含的信息量约有 60%的信息量来源于轻度沉降和中度沉降的转移,结合稳定状态时北京平原以严重沉降状态为主,表明北京平原地面沉降状态在未来 20 年可能不断恶化.

5 结论及讨论

PS-InSAR 技术理论上可以获取毫米级的地面沉降变化,本文利用该技术获取了北京平原地区的地面沉降的空间分布,并通过马尔科夫和信息熵理论分析了北京平原地面沉降的空间结构演化特征.根据计算结果,在当前情况下,北京平原地面沉降结构将在 2025 年达到稳定,稳定状态下以严重沉降为主,约占整个平原区面积的 84%;地面沉降结构的信息熵与传统的生态系统信息熵的理论相反,生态系统信息熵越小,说明其多样性程度低导致其复杂性较低,从而降低了系统稳定性,而地面沉降结构的信息熵越低说明其差异系沉降程度较低,因此整个地区的稳定性能够得到提高.

值得注意的是,北京平原地面沉降结构信息熵在达到稳定状态之前是可能发生变化的,以 2009 年为例,该年的信息熵大于 2005 年和稳定状态下的信息熵,说明沉降结构的不稳定性较强,因此仍需要加强对地面沉降的防治工作.另外,由于数据以及方法的限制,利用马尔科夫和信息熵方法只能获取其面积变化,而不能得到稳定状态下不同状态地面沉降的空间分布,在未来的工作中,应该充分利用遥感技术的周期性特征,获取较长时间序列的地面沉降数据,并从象元尺度探讨地面沉降的演化规律,从而为城市建设安全提供科学的决策支持.

参 考 文 献

[1] 薛禹群,张云,叶淑君,等. 中国地面沉降及其需要解决的几个问题[J]. 第四纪研究,2003,6:585 - 593.

[2] 刘毅. 地面沉降研究的新进展与面临的新问题[J]. 地学前缘,2001,2:273 - 278.

[3] 王志勇. 星载雷达干涉测量技术在地面沉降监测中的应用[D]. 山东科技大学,2007.

[4] Zebker. H. A, C. L. Werner, P. A. Rosen, et al. Accuracy of topographic maps derived from ERS - 1 interferometric radar [J]. IEEE Transactions on Geosciences and Remote Sensing, 1994, 32(4): 823 - 836.

[5] Galloway, D. L, K. W. Hudnut, S. E. Ingebritsen, et al. Detection of aquifer system compaction and land subsidence using interferometric synthetic aperture radar, Antelope Valley, Mojave Desert, California [J]. Water Resources Research, 1998, 34: 2573 - 2585.

[6] Buurgmann, Roland, Hilley, et al. Resolving vertical tectonics in the San Francisco bay area from permanent scatterer

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

InSAR and GPS Analysis [J]. Geology,2006,34(3):221 – 224.
[7] Fretti. A, Savio. G, Barzaghi. R, Borghi. A, Musazzi. S, et al. Submillimeter accuracy of InSAR time series [M]: Experimental Validation, GeoRS(45),2007,5:1142 – 1153.
[8] A. Hooper. A multi-temporal InSAR method incorporating both persistent scatterer and small baseline approaches [J]. Geophysical Research Letters, 2008,35: L16302. 1 – L16302. 5.
[9] 杨艳,贾三满,罗勇,等. 北京地面沉降工作分析及展望 [J]. 城市地质,2012,2:9 – 13.
[10] 赵常洲,龚固培,王晖. 地面沉降成因与危害 [J]. 西部探矿工程,2006,1:261 – 263.
[11] 周琪,叶义成,吕涛. 系统安全态势的马尔科夫预测模型建立及应用 [J]. 中国安全生产科学技术,2012,04:98 – 102.
[12] 王国良,李桂玲. 地面沉降危险性分级量化分析 [J]. 城市地质,2007,02:1 – 26.
[13] 刘贤赵,张安定,李嘉竹. 地理学数学方法 [M]. 科学出版社,2008.
[14] 谭永忠,吴次芳. 区域土地利用结构的信息熵分异规律研究 [J]. 自然资源学报,2003,1:112 – 117.
[15] 王宗明,张柏,黄素军,等. 基于 GIS 和信息熵的松嫩平原土地利用结构演化分析——兼论系统无序度、复杂性与多样性 [J]. 农业系统科学与综合研究,2005,3:196 – 200.

Analyze about the Evolution of Deformation Structure in Beijing Plain

Xie Jinrong　Gong Huili　Chen Beibei　Zhu Feng

(College of resources and environment and Tourism, Capital Normal University, Beijing　100048)

Abstract

Land subsidence especially uneven ground subsidence affects the city construction and economic development seriously, exploration about the evolution deformation structure has important significance for prevention and control of ground settlement. In this paper, based on remote sensing and GIS technology, the Markoff and the information entropy theory are employed to analyze the characteristics of the evolution of land subsidence in Beijing plain, the results show that: the deformation structure will be stable in 2025 and the severe settlement area ratio reached 84%; the serious subsidence area is from the transformation of mild and moderate subsidence area, the transformed information entropy is 1.049 9 bit and 1.162 6 bit separately; the stable information entropy in plain about 0.772 8 bit, the homogeneity is increased, which illustrates the stability of the system is improved.

Key words: Deformation, PS-InSAR, Markoff, Information Entropy, Evolution.

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net