

区域地质灾害评价的空间效应分析

朱吉祥, 张礼中, 周小元, 陆 琰

(中国地质科学院 水文地质环境地质研究所, 石家庄 050061)

摘要: 区域地质灾害评价依赖于具体的时空尺度。由于评价因子在时间上的非线性演变规律与在空间上的非均质性分布特征, 区域地质灾害评价必然会受尺度效应的影响。但是由于地质灾害影响因素(例如地层岩性、地形地貌等)演变的相对缓慢性, 目前区域地质灾害的尺度效应主要表现为空间效应。在探讨导致区域地质灾害评价空间效应内在因素的基础上, 分析了空间效应对区域地质灾害评价不确定性的影响机制, 对研究区域地质灾害评价的不确定性, 提高评价的精度具有一定的理论价值与实际意义。

关键词: 区域地质灾害; 空间效应; 危险性评价; 不确定性分析

中图分类号: P694 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-1683(2015)02-0334-05

Spatial effect analysis of regional geological hazards

ZHU Ji xiang, ZHANG Li zhong, ZHOU Xiao yuan, LU Yan

(Institute of Hydrogeology and Environmental Geology, CAGS, Shijiazhuang 050061, China)

Abstract: Evaluation of the regional geological hazards depends on the specific spatial and temporal scale. Due to the nonlinear evolution in the temporal scale and heterogeneity in the spatial scale of the evaluation indexes, the geological hazard assessment is inevitably impacted by the scale effect. However, the evolution of factors (such as the stratum and topography) is relatively slow, the scale effect presents mainly as spatial effect. Based on analysis of the internal factors which cause the spatial effect of the regional geological hazards, the influencing mechanism of spatial effect on the uncertainty of the regional geological hazards assessment was investigated, which is of great significance for the study of uncertainty and improvement of evaluation precision of regional geological hazards.

Key words: regional geological hazard; spatial effect; risk assessment; uncertainty analysis

1927年, 德国科学家海森堡提出了著名的测不准原理: 不可能同时确定一个物体的位置和动量^[1]。位置量测越准确, 对于动量的确定越不准确, 反之亦然。位置代表事物过去或现在的状态, 动量代表事物的发展趋势。测不准原理表明: 人们无法同时准确地再现过去和预测未来^[2-3]。区域地质灾害评价主要是利用过去的地质灾害观测资料对研究区未来地质灾害发生的概率进行分析与预测^[4-5], 因此评价的不确定性必然内蕴于相应的评价结果中。

区域地质灾害评价是在一定时空范围内, 根据研究区地质环境背景、气候条件等自然因素及人类活动状况, 对地质灾害发生的概率做出评估^[6-7]。一方面, 地质灾害作为一定时间和空间内的自然现象, 具有时空尺度的相关性质; 另一方面, 地质灾害的影响因素(例如地形地貌、地质构造等)作为区域性的自然条件, 其外在的表征特性(例如面积、形态

等)也会受到尺度的影响。因此, 区域地质灾害的尺度特性是其内在固有属性之一^[8]。自20世纪80年代中期以来, 在生态学、地理学和遥感领域内的尺度问题研究^[9-15], 对于区域地质灾害评价的尺度研究具有重要的借鉴意义。随着人类活动对环境影响的广度和深度的加大^[16-17], 以及极端自然事件的愈加频繁^[18-19], 地质灾害影响因素的演变进程不断加剧; 同时监测资料的积累, 以及评价技术的进步, 客观上提高了区域地质灾害的评价精度, 也为区域地质灾害评价尺度效应研究的提供了有利条件。

1 区域地质灾害评价的尺度效应

尺度是自然过程抑或观测研究在空间、时间抑或时空域上的特征量度^[20-22], 凡是与地球参考位置有关的数据都具有尺度特性。区域地质灾害评价的尺度效应是指在进行区域

收稿日期: 2014-08-11 修回日期: 2015-02-05 网络出版时间: 2014-03-20

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20150319.1626.020.html>

基金项目: 中国地质调查局国土资源大调查项目“全国主要城市环境地质综合评价”(1212010535501);“地下水资源数据集成与服务系统建设”(1212011120426)

作者简介: 朱吉祥(1987-), 男, 江西吉安人, 主要从事水文地质和工程地质调查信息化方面的研究。E-mail: hellouzjx@126.com

地质灾害评价的过程中,由于利用了不同时空尺度上的信息来源进行分析,导致评价结果产生不确定性的现象。尺度效应产生的根本原因是介质在空间领域的非均质性与在时间领域的非线性特征^[23-24]。如果将地质灾害固有的尺度作为本征尺度(用 A 表示),对其进行观测与研究的尺度称为非本征尺度(用 B 表示),则有

$$f_A(x_a, y_a, z_a, \dots) \Rightarrow K_A \quad (1)$$

$$f_B(x_b, y_b, z_b, \dots) \Rightarrow K_B \quad (2)$$

式中: x_i, y_i, z_i 表示相应尺度 i 下的影响因素, $i \in \{a, b\}$; K_i 表示相应尺度 j 下的评价结果, $j \in \{A, B\}$; f_j 表示相应尺度 j 下由影响因素 x_i, y_i, z_i, \dots 确定评价结果 K_j 的函数; \Rightarrow 表示分析的过程(模型、方法等)。

按照拉普拉斯观点,如果知道某一时刻物体的位置和速度,就能确定该物体在过去和未来的位置和速度。在区域地质灾害评价中,非本征尺度上的地质灾害影响因素(x_b, y_b, z_b, \dots)与本征尺度上的(x_a, y_a, z_a, \dots)越接近;同时非本征尺度下的函数 f_B 与本征尺度下的函数 f_A 越接近,则两者获取的结果 K_B, K_A 就越接近。将本征尺度下的 K_A 理解为研究区地质灾害危险性区划的实际概率,非本征尺度下的 K_B 为根据观测资料获取的研究区地质灾害危险性区划的分析概率,于是有

$$C = |K_A - K_B| \quad (3)$$

$$F_{B \rightarrow A}(f_B) \rightarrow f_A \quad (4)$$

$$F_{b \rightarrow a}(x_b, y_b, z_b, \dots) \rightarrow (x_a, y_a, z_a, \dots) \quad (5)$$

式中: C 表示评价结果与实际区划结果之间的误差,也就是评价结果的不确定性; $F_{B \rightarrow A}$ 表示函数 f_B 对 f_A 的贴进度, $0 \leq F_{B \rightarrow A} \leq 1$; $F_{b \rightarrow a}$ 表示非本征尺度下影响因素(x_b, y_b, z_b, \dots)对本征尺度下影响因素(x_a, y_a, z_a, \dots)的贴进度, $0 \leq F_{b \rightarrow a} \leq 1$ 。

因此,在拉普拉斯观点下,当 $F_{B \rightarrow A}$ 越趋于 1,同时 $F_{b \rightarrow a}$ 越趋于 1,评价结果的不确定性 C 的值就越趋于 0。然而测不准原理表明, $F_{B \rightarrow A}$ 和 $F_{b \rightarrow a}$ 不可能同时逼近于 1,它们总是向相反的方向进行,二者的关系实质上是不可兼得的互抑关系。这种互抑关系本质上是由介质的非线性引起的^[25-24]。

区域地质灾害评价主要有两种思路:(1)充分考虑影响因素(x_b, y_b, z_b, \dots),认为(x_b, y_b, z_b, \dots)越全面,评价结果的不确定性越小;(2)充分考虑评价因素的综合影响模式,即 \bar{f} ,认为 \bar{f} 越精确,评价结果的不确定性越小。由于评价因素的影响模式由每个影响因素的影响模式 f_B 共同决定,因此有

$$f_B = \bar{f}(f(x_b), f(y_b), f(z_b), \dots) \quad (6)$$

式中: $f(x_q)$ 表示单个影响因素对地质灾害的影响模式, $q \in \{a, b, c, \dots\}$; \bar{f} 表示 $f(x_q)$ 的综合影响模式。

一方面,如果考虑的因素越全面,即非本征尺度下影响因素越接近本征尺度,即 $F_{b \rightarrow a}$ 越趋于 1,客观上要求 $f(x_q)$ 越准确;由于地质灾害是一个开放的非线性系统, $f(x_q)$ 在理论上主要以非线性函数为主,因此如果 $f(x_q)$ 越全面,评价模型的非线性特征越强,导致 \bar{f} 的离散性特征越强,使得获取 \bar{f} 的难度大大增加,甚至无法获取;另一方面,如果考虑综合影响模式 \bar{f} 越确定,客观上要求考虑的影响因素应当越少,因此,黄润秋等^[29]认为在一次评价过程中一般应当选取 3~5 个影响因素。

2 区域地质灾害评价的空间效应

由于地质灾害影响因素演变的缓慢性,使得其在时间上的非线性演变特征对评价不确定性影响通常认为是可以忽略的(尽管近些年来也逐渐受到关注),因此,区域地质灾害评价的尺度效应主要以由介质的空间非均质性产生的空间效应为主。

2.1 比例尺对区域地质灾害评价结果精度的影响

区域地质灾害评价依托于一定比例尺的要素图层,地质灾害影响因素在空间上都具有一定形态特征,例如岩性、地形地貌、地质构造等。任何尺度下获取的地质灾害信息都是由两部分信息组成:确定信息 P 与随机信息 Q ,评价结果的不确定性 C 是关于 P, Q 的函数,即

$$C = f_s(P, Q) \quad (7)$$

$$P = f_p(s) \quad (8)$$

$$Q = f_q(s) \quad (9)$$

式中: s 表示当前比例尺; f_s 表示评价结果不确定性 C 关于比例尺 s 的函数; P 表示当前比例尺 s 下评价要素的确定性信息; Q 表示当前比例尺 s 下评价要素的不确定性信息,如随机信息、白噪声等; f_p 表示 P 关于 s 的函数; f_q 表示 Q 关于 s 的函数。

区域地质灾害评价结果的不确定性 C 与评价要素的确定性信息 P 呈负相关,与要素的随机信息 Q 呈正相关。根据拉普拉斯观点,比例尺 s 越大,蕴含细节信息更多,因此评价要素的确定性信息 P 随着比例尺 s 的变化而呈正相关关系。但是由于地质灾害影响因素的空间形态在小尺度(大比例尺下)的随机性会增加,以及信息获取难度的增加等,使得不确定性信息 Q 也随比例尺的变化而呈正相关关系。拉普拉斯观点只考虑了确定性信息 P 与比例尺 s 的正相关变化,而忽略了不确定性信息 Q 也随比例尺 s 的正相关变化。

总之,区域地质灾害评价结果的不确定性 C 并不一定随比例尺的增大而减小,因此如何在一次评价中选取合适比例尺的要素图层,应当充分考虑研究地质环境的复杂性、评价结果的精度需求等因素。

2.2 分析粒度对区域地质灾害评价结果精度的影响

所谓粒度,包括空间粒度与时间粒度。空间粒度是指空间最小可辨识单元所代表的特征长度、面积或体积(如样方、像元),亦即一次评价过程中最小的评价单元,一般指评价图层进行单元格剖分的大小;时间粒度指某一现象或事件发生的(或取样的)频率或时间间隔^[26-29]。空间粒度大小对评价结果的精度具有重要影响作用,已有的经验一般采用 $1 \times 1 \sim 3 \times 3 \text{ km}^{2[30]}$,但是由于研究区地质环境和评价尺度(规模或比例尺等)的不同,粒度大小也应有所差别。空间粒度大的区域地质灾害评价,忽略的信息就越多,评价结果呈现的“斑块化”效果就越明显,只能反映宏观性的区域地质灾害区划信息,其实效性主要由研究区地质环境的复杂性与范围决定:背景越复杂,同时范围越小,实效性就越差。空间粒度越小的区域地质灾害评价,反映的信息更多,对数据精确性的要求更高,而且评价过程中的不确定性信息 Q 也会随之增加。因此,应当在考虑评价结果的精度要求,综合分析研究

区地质环境背景的复杂性 J 和研究区的范围或规模 S 的基础上, 确定空间粒度 A , 即

$$C = f_A(A, \dots) \quad (10)$$

$$A = f_a(S, J) \quad (11)$$

式中: C 为评价结果的不确定性。

2.3 不同比例尺下区域地质灾害影响因素的权重变化

地质灾害影响因素的权重是表征该影响因素在地质灾害演变与发生的过程中的重要程度。在进行区域地质灾害评价的过程中, 为了能够全面地进行分析, 往往需要选取在时空尺度上具有不同变化速率的影响因素进行研究。每种控制地质灾害演变与发生的因素在时空尺度上的易变性不尽相同, 一般来说降水、坡度最易发生改变, 地貌与植被次之, 地层岩性、地质构造最不易发生变化。在大尺度上, 人们往往关注更多的是事物在空间上的整体特性; 而在小尺度上, 更关注事物的细节信息, 而宏观空间特性往往只作为约束条件。已有的尺度研究表明: 随着空间尺度的增大, 变化速率高的影响因素地位下降, 甚至被抹除; 而变化较慢的影响因素则会得到保留, 甚至被凸显^[21]。因此, 在区域地质灾害评价的过程中, 时空变化慢的影响因素(如地层岩性、地质构造等), 在小比例尺(对应大尺度)下, 其权重应适当加以“凸显”; 而时空变化比较快的影响因素(如降水量、坡度等), 在大比例尺(对应小尺度)下, 其权重应适当加以“凸显”。

对于同一研究区的地质灾害而言, 不同的比例尺下的其影响因素的权重并不是固定的, 而是根据时空变化特性, 有目的地进行调整。不同时空变化速率的影响因素的权重随比例尺变化规律见图 1。

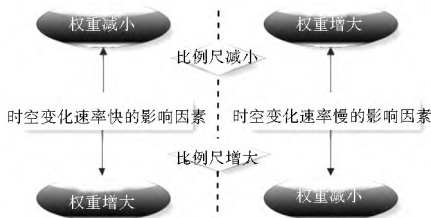


图 1 不同时空变化速率的影响因素的权重随比例尺变化示意图

Fig. 1 Variation of the weights of impact factors with the different variation rates of temporal and spatial scale

2.4 监测资料的比例尺转换对区域地质灾害评价结果精度的影响

由于基础数据不完整, 或者图层中某些属性数据丢失或错误, 或者需要其他比例尺下的数据等原因, 在区域地质灾害评价过程中, 常常要通过比例尺转换获取同一比例尺下的所需的数据。目前的各种比例尺转换工具主要是基于线性思维的机械化转化思路, 关注的是图层要素几何特征的概化和消隐等, 而忽视了内部属性随比例尺变化的非线性特征。已有研究表明^[21, 31], 在尺度域的过渡带, 依赖时空特性的监测数据会出现混沌、灾变或不可预知的非线性变化, 因此两个不同比例尺下的数据之间的转换通常是不对等的, 即

$$I_p^1 \xrightarrow{n} I_q^1 \quad (12)$$

$$\frac{1}{I_p^2} \xrightarrow{n} I_q^2 \quad (13)$$

$$I_p^1 \neq I_p^2 \quad (14)$$

$$I_q^1 \neq I_q^2 \quad (15)$$

式中: I_p^1 表示数据为当前比例尺 p 下数据包含的信息量; I_q^1 表示比例尺 p 下的数据 I_p^1 在比例尺变化 n 后数据包含的信息量; I_q^2 表示数据当前比例尺 q 下数据包含的信息量; I_p^2 表示比例尺 q 下的数据 I_q^2 在比例尺变化 $\frac{1}{n}$ 后数据包含的信息量。

在进行比例尺转换时, 由于无法掌握信息变化情况, 只能对其进行简化处理, 即假设信息在比例尺转换时是按照既定的、已知的模式进行的, 这种由人为设置好的模式必然会与信息的真实变化过程有偏差。理论上, 无法通过比例尺转换再现当前比例尺下数据的真实信息。因此, 比例尺转化必然会影响到评价结果的精度。

2.5 不同比例尺下的区域地质灾害影响因素的相关性

具有空间属性的区域地质灾害影响因素一般具有空间非平稳性特征。空间非平稳性是指多个变量之间的空间关系随尺度的变化而产生的不稳定性^[32, 37]。空间非平稳性依存于具体的尺度域, 与尺度大小负相关。换言之, 随着尺度的变小(比例尺的增大), 空间变化速率快的区域地质灾害影响因素之间的相关性会增加(如在局部区域坡度对第四纪松散堆积物的控制作用; 光照条件对植被种类的影响等), 而空间变化速率慢的影响因素(如岩性、地质构造等)会由于自身非线性特征的加强, 相互之间的相关性会变得不明显; 反之, 随着空间尺度的变大, 空间变化速率快的区域地质灾害影响因素之间的相关性会减小, 蕴含于其中的相关性信息也必然会随之抹除, 而空间变化速率慢的区域地质灾害影响因素的相关性也会相应减小, 但变化较小, 反而尺度变大使得影响因素的线性特征增加, 凸显了空间变化速率慢的影响因素的相关关系。不同时空变化速率的影响因素的相关性随比例尺变化规律见图 2。

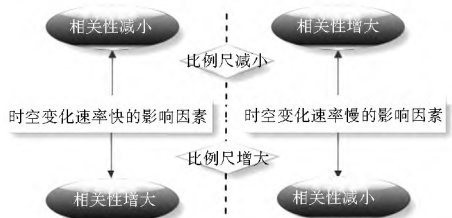


图 2 不同时空变化速率的影响因素之间的相关性随比例尺变化示意图

Fig. 2 Variation of the connection of impact factors with different variation rates of temporal and spatial scale

2.6 研究范围与背景条件对区域地质灾害的可评价性的影响

区域地质灾害评价是一个确定性的评价过程, 要求其影响因素是可以测量的。在大尺度上地质灾害影响因素的线性特征加强, 空间非稳定性减弱, 在空间上往往会呈现出一种相对的“不变性”, 例如地层岩性分布、多年平均降水量分布等, 使得区域地质灾害影响因素的空间格局是确定的, 这

决定了在大尺度上区域地质灾害的可评价性。小尺度上地质灾害影响因素的空间非稳定性较高,由此产生的混沌现象使得地质灾害影响因素的某些空间特征和行为变得不可确定,使得区域地质灾害可能不可评价。因为在小尺度内,时空变化速率较慢的地层岩性、地质构造只具有控制区域地质灾害区划的作用,评价结果的内容必然需要包含更多地质灾害的局部区划内容,而针对局部地质灾害区划所需要的信息却包含较高的不确定性,导致区域地质灾害的空间分布必然具有一定的随机性。

从尺度上分析,影响区域地质灾害可评价性的主要因素如下。

(1) 研究区的规模或范围。研究的规模或范围直接决定了区划的信息量,研究区规模越小,相应评价所需要的尺度也应越小。小尺度的地质灾害区划需要更多的局部区划信息,但是由于这些局部信息本身包含一定的不确定性,获取这些局部信息所需的监测数据也包含一定的随机性,这种数据内部的随机性比会随着监测数据量的增多而累积,可能导致小尺度内的区域地质灾害评价不可行。

(2) 研究区背景条件的复杂性。主要包括地层岩性复杂多变、地质构造强烈发育,断裂带广泛分布、地形地貌丰富多样等,它决定了信息的质量,控制着信息的空间变化速率。研究区背景条件越复杂,特别是空间变化速率较慢的地层岩性、地质构造等背景条件越复杂,地质灾害的区划信息中的非线性特征会越来越明显,信息的空间非平稳性和非均质性也会越明显,监测数据包含的随机性也会越多,同样可能导致区域地质灾害评价变得不可行。

3 结论

(1) 地质灾害作为一种自然现象,在时间上呈现非线性的演变规律,在空间上呈现非均质的分布特征。由于地质灾害内蕴尺度的性质,以及作为制约地质灾害演变与发育的影响因素在时空领域呈现出特定的尺度特征,因此尺度效应是控制区域地质灾害评价不确定性的客观因素之一。

(2) 区域地质灾害评价的空间效应主要表现为:比例尺、分析粒度、比例尺转换对区域地质灾害评价结果精度的影响,不同比例尺下区域地质灾害影响因素的权重与相关性的变化现象,以及研究区规模与背景条件对区域地质灾害的可评价性的影响等。

(3) 随着全球极端自然事件的频发,特别人类活动对地质环境改造的加剧,地质灾害影响因素的演变进程大大加快,地质灾害在时间上的非线性演变特征对区域地质灾害评价的不确定性的影响已经呈现出加深的趋势,使得尺度效应变得更加复杂。

参考文献(References):

[1] Paul Busch, Teiko Heinonen, Pekka Lahti. Heisenberg's uncertainty principle[J]. Physics Reports, 2007, 254(6): 155-176.
 [2] 史蒂芬·霍金, 吴忠超(译). 果壳中的世界[M]. 长沙: 湖南科学技术出版社, 2003: 101-130. (Stephen Hawking. The universe in a nutshell[M]. Changsha: Hunan Science & Technology Press, 2003: 101-130. (in Chinese.))

[3] 史蒂芬·霍金, 许明贤(译). 时间简史[M]. 长沙: 湖南科学技术出版社, 2004: 68-81. (Stephen Hawking. A brief history of time[M]. Changsha: Hunan Science & Technology Press, 2004: 68-81. (in Chinese.))
 [4] Ren e Schicker, Vicki Moon. Comparison of bivariate and multivariate statistical approaches in landslide susceptibility mapping at a regional scale[J]. Geomorphology, 2012 (161-162): 40-57.
 [5] Van Westen, C J, van Asch, T W J., et al. Landslide hazard and risk zonation —why is it still so difficult[J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2006(65): 167-184.
 [6] Michele Calvello, Leonardo Cascini, Sabrina Mastroianni. Landslide zoning over large areas from a sample inventory by means of scale dependent terrain units[J]. Geomorphology, 2013, 182: 33-48.
 [7] Robin Fell, Jordi Corominas, Christophe Bonnard, et al. Guidelines for landslide susceptibility, hazard and risk zoning for land use planning[J]. Engineering Geology, 2008(102): 85-98.
 [8] 杨勤科, 李锐, 徐涛, 等. 区域水土流失过程及其定量描述的初步研究[J]. 亚热带水土保持, 2006, 18(2): 20-23. (YANG Qirke, LI Rui, XU Tao, et al. Preliminary study of regional soil erosion process and its quantitative description[J]. Subtropical Soil and Water Conservation, 2006, 18(2): 20-23. (in Chinese))
 [9] Meentemeyer V and Box E O. Scale effects in landscape studies[M]. In: Turner M G ed. Landscape Heterogeneity and Disturbance. New York: Springer-Verlag, 1987: 15-34.
 [10] Turner M G, O'Neill R V, Gardner R H, et al. Effects of changing spatial scale on the analysis of landscape pattern[J]. Landscape Ecology, 1989, 3: 153-162.
 [11] Benson B J, Mackenzie M D. Effects of sensor spatial resolution on landscape structure parameters[J]. Landscape Ecology, 1995, 10: 113-120.
 [12] Wickham J D and Riitters K H. Sensitivity of landscape metrics to pixel size[J]. International Journal of Remote Sensing, 1995, 16: 3585-3595.
 [13] O'Neill R V, Hunsaker C T, Timmins S P, et al. Scale problems in reporting landscape pattern at the regional scale[J]. Landscape Ecology, 1996, 11: 169-180.
 [14] Qi Y and Wu J. Effects of changing spatial resolution on the results of landscape pattern analysis using spatial autocorrelation indices[J]. Landscape Ecology, 1996, 11: 39-49.
 [15] Saura S and Martinez Millan J. Landscape patterns simulation with a modified random clusters method[J]. Landscape Ecology, 2000, 15: 661-678.
 [16] Fabrizio de Luiz Rosito Listo, Bianca Carvalho Vieira. Mapping of risk and susceptibility of shallow landslide in the city of So Paulo, Brazil[J]. Geomorphology, 2012, 169-170: 30-44.
 [17] S. Lee, J. Hwang a, I. Park. Application of data driven evidential belief functions to landslide susceptibility mapping in Jirbu, Korea[J]. Catena, 2012, 100: 15-30.
 [18] Shiwakoti, D R. An assessment of soil loss and natural hazards in Nepal[J]. Journal of Nepal Geological Society, 2000, 21: 41-48.
 [19] Bijukchhen, S M, Kayastha, et al. A comparative evaluation of heuristic and bivariate statistical modeling for landslide sus-

- ceptibility mappings in Ghurmi Dhad Khola, east Nepal[J]. Arabian Journal of Geosciences, 2012, <http://dx.doi.org/10.1007/s12517-012-0569-7>.
- [20] Band L E, Moore I, D. Scale: Landscape attributes and geographical information systems[J]. Hydrol Process, 1995, 9: 401-422.
- [21] 李双成, 蔡运龙. 地理尺度转换若干问题的初步探讨[J]. 地理研究, 2005, 24(1): 11-18. (LI Shuangcheng, CAI Yurong. Some scaling issues of geography[J]. Geographical Research, 2005, 24(1): 11-18. (in Chinese.))
- [22] 倪九派, 魏朝富, 谢德体. 土壤侵蚀定量评价的空间尺度效应[J]. 生态学报, 2005, 25(8): 2061-2067. (NI Jiupai, WEI Chaofu, XIE Detti. Effects of spatial scale on the quantitative estimation of soil erosion[J]. Acta Ecologica Sinica, 2005, 25(8): 2061-2067. (in Chinese))
- [23] Cammeraat E L. Scale dependent thresholds in hydrological and erosion response of a semi arid catchment in southeast Spain[J]. Agriculture, Ecosystems and Environment, 2004, 104: 317-332.
- [24] Zhang R H, Sun X M, Su H B, et al. Remote sensing and scale transferring of levity parameters on earth surface[J]. Remote Sensing for Land and Resource, 1999, 3: 51-58.
- [25] 黄润秋, 向喜琼, 巨能攀. 我国区域地质灾害评价的现状与问题[J]. 地质通报, 2004, 23(11): 1078-1082. (HUANG Runqiu, XIANG Xiqiong, JU Nengpan. Assessment of China's regional geohazards: present situation and problem[J]. Geological bulletin of China, 2004, 23(11): 1078-1082. (in Chinese))
- [26] Lam N S N, Quattrochi D A. On the issues of scale, resolution, and fractal analysis in the mapping sciences[J]. Professional Geographer, 1992, 44: 88-98.
- [27] Jenerette G D and Wu J. On the definitions of scale[J]. Bulletin of the Ecological Society of America, 2000, 81: 104-105.
- [28] Schneider D C. The rise of the concept of scale in ecology[J]. Bioscience, 2001, 51: 545-553.
- [29] Wu J Landscape Ecology: Pattern, Process, Scale and Hierarchy[M]. Beijing: Higher Education Press, 2000.
- [30] 赵忠海. 北京地区突发性地质灾害危险性评价[J]. 地质灾害与环境, 2009, 20(3): 39-44. (ZHAO Zhonghai. Risk assessment of the unexpected geological disasters in Beijing[J]. Journal of Geological Hazards and Environment Preservation, 2009, 20(3): 39-44. (in Chinese))
- [31] Roland Schulze. Transcending scales of space and time in impact studies of climate and climate change on agrohydrological responses[J]. Agriculture, Ecosystems and Environment, 2001, 82: 185-212.
- [32] 玄海燕, 李帅峰. 时空加权回归模型的非平稳性检验[J]. 甘肃科学学报, 2012, 24(2): 1-4. (XUAN Haiyan, LI Shuaifeng. The nonstationarity tests of geographically and temporally weighted regression model[J]. Journal of Gansu Science, 2012, 24(2): 1-4. (in Chinese))
- [33] 魏传华, 胡晶, 吴喜之. 空间自相关地理加权回归模型的估计[J]. 数学的实践与认识, 2010, 40(22): 126-134. (WEI Chuanhua, HU Jing, WU Xizhi. Estimation of geographically weighted regression with spatial autocorrelation[J]. Mathematics in Practice and Theory, 2010, 40(22): 126-134. (in Chinese))
- [34] Brunson C, Fotheringham As, Charlton M. Geographically weighted regression: A method for exploring spatial nonstationarity[J]. Geographical Analysis, 1996, 28(4): 281-298.
- [35] Brunson C, Fotheringham As, Charlton M. Spatial nonstationarity and autoregressive models[J]. Environment and Planning A, 1998, 30: 957-973.
- [36] Huang Yefang, Leung Yee. Analysing regional industrialisation in Jiangsu province using geographically weighted regression[J]. J Geograph Syst, 2002, 4: 233-249.
- [37] Park Nokil. Estimation of average annual daily traffic (AADT) using geographically weighted regression (GWR) method and geographic information system (GIS)[R]. Florida: Florida International University, Doctor Dissertation, 2004.

(上接第 256 页)

- [19] 张玉晨, 林健. 北京市平原区地下水水质概况[J]. 北京地质, 2000, 12(1): 9-18. (ZHANG Yuchen, LIN Jian. Brief introduction of groundwater quality in Beijing plain[J]. Beijing Geology, 2000, 12(1): 9-18. (in Chinese))
- [20] 姜体胜, 杨忠山, 黄振芳, 等. 北京郊区浅层地下水总硬度变化趋势及其机理浅析[J]. 水文地质工程地质, 2010, 37(4): 33-37. (JIANG Tisheng, YANG Zhongshan, HUANG Zhenfang, et al. Tendency and mechanism analysis of total hardness in shallow groundwater in the suburb of Beijing[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2010, 37(4): 33-37. (in Chinese))
- [21] 程东会, 陈鸿汉, 何江涛, 等. 北京城近郊区地下水人为影响和水-岩作用指示性指标研究[J]. 水文地质工程地质, 2007, 34(5): 37-42. (CHENG Donghui, CHEN Honghan, HE Jiangtao, et al. A study of indicators of anthropogenic influence and water-rock interaction in groundwater system in the urban region of Beijing[M]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2007, 34(5): 37-42. (in Chinese))
- [22] 王东胜, 沈照理, 钟佐荣, 等. 氮迁移转化对地下水硬度升高的影响[J]. 现代地质, 1998, 12(3): 431-436. (WANG Dongsheng, SHEN Zhaoli, ZHONG Zuorong, et al. Effects of nitrogen transformation on hardness increment of groundwater[J]. Geoscience, 1998, 12(3): 431-436. (in Chinese))