

# 北京昌平平原区地下水污染特征

肖勇<sup>1</sup>, 邵景力<sup>1</sup>, 顾晓敏<sup>1</sup>, 赵微<sup>2</sup>, 郝奇琛<sup>1</sup>

(1. 中国地质大学(北京) 水资源与环境学院, 北京 100083; 2. 北京市水文地质工程地质大队, 北京 100095)

**摘要:** 在地下水采样分析基础上, 采用模糊聚类分析法、主成分分析法及相关分析法, 对北京昌平区地下水水质污染成因进行识别。结果表明, 昌平区地下水水质可以分为天然型、污染型、污染超采型三种成因类型; 地下水中主要超标物为氮素、总硬度、TDS 和氟化物, 超标率分别为 15.79%、10.53%、10.53% 和 5.26%; 氮素包括硝氮、亚硝氮和氨氮, 主要来源于污染物输入, 其存在形式与水文地质条件及污染物输入量有关; 总硬度和 TDS 则由污染和地下水超采共同造成; 氟化物由原生作用形成。

**关键词:** 模糊聚类; 地下水; 污染; 北京昌平

中图分类号: X508 文献标志码: A 文章编号: 1672-1683(2015)02-0252-05

## Characteristics of groundwater pollution in Changping Plain of Beijing

XIAO Yong<sup>1</sup>, SHAO Jing-li<sup>1</sup>, GU Xiaomin<sup>1</sup>, ZHAO Wei<sup>2</sup>, HAO Qichen<sup>1</sup>

(1. School of Water Resources and Environment, China University of Geosciences, Beijing 100083, China;

2. Beijing Institute of Hydrogeology and Engineering Geology, Beijing 100095, China)

**Abstract:** This paper investigated the causes of groundwater pollution in Changping District using the fuzzy cluster analysis, principal component analysis, and correlation analysis based on groundwater sampling analysis. The results showed that the groundwater quality types can be divided into three categories: natural type, pollution type, and pollution overexploitation type; the major over standard indicators are nitrogen, total hardness, TDS, and fluoride with the exceeding rates of 15.79%, 10.53%, 10.53%, and 5.26% respectively; the nitrogen pollution includes nitrate, nitrite, and ammonia and is mainly from the input of pollutants, and the pollution forms of nitrogen are related to the hydrogeological conditions and amount of input contaminants; over standard total hardness and TDS are caused by the pollution and overexploitation; and fluoride is from the geological evolution.

**Key words:** fuzzy clustering; groundwater; pollution; Changping of Beijing

20 世纪 70-80 年代, 北京市中心城区地下水就已出现总硬度和硝酸盐超标现象<sup>[1]</sup>, 随后不断恶化, 到 2011 年北京 174 眼浅层监测井中有 76 眼超标, 超标面积占平原区总面积的 49%<sup>[2]</sup>。昌平区地处北京城西北山前, 是北京平原区地下水的重要补给区, 其水质状况对北京市地下水具有重要影响, 了解昌平平原区地下水的污染特征及污染来源, 能够为首都地下水的开发利用及污染防治工作提供重要依据。

地下水由于其埋藏赋存条件的特殊性, 水化学特征的形成与演化过程十分复杂, 水质涵盖信息巨大, 水质演化规律及污染特征识别较为困难。实践证明, 多元统计分析(包括聚类分析、主成分分析、因子分析等)能够从水质的巨大信息量中提取有效信息, 因此被广泛应用于地下水水质分析及污染识别中<sup>[3-5]</sup>。但是, 由于水质指标间均或多或少地存在一

定关联, 信息相互叠加与干扰, 使得传统的水质分类和污染源识别方法存在一定误差甚至错误。模糊聚类分析是一种将模糊数学理论与聚类分析相结合的统计分析方法, 对解决地下水水质界限模糊与信息重叠等问题具有较好效果<sup>[6]</sup>。本文采用模糊聚类分析法对昌平区地下水水质成因类型进行划分与识别, 并利用主成分分析法, 结合相关分析和水文地球化学理论对聚类结果及水质成因进行了深入探讨, 以期客观准确地识别研究区地下水的污染源类别, 为昌平区今后的地下水资源管理及开发利用提供可靠依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

昌平区位于东经 115°50'17" - 116°29'49", 北纬 40°2'18" -

收稿日期: 2014-03-03 修回日期: 2015-01-19 网络出版时间: 2014-03-18

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20150318.1409.002.html>

基金项目: 北京市环境保护局“地下水环境功能区划定方案项目”(HCZB-2012-BJ1188)

作者简介: 肖勇(1989-), 男, 四川简阳人, 博士研究生, 主要从事水资源开发与可持续利用方面的研究。E-mail: cugbxy@163.com

通讯作者: 邵景力(1959-), 男, 山东滕州人, 教授, 主要从事水文学及水资源方面的研究。E-mail: jshao@cugb.edu.cn

40°23'13",为北京市西北部辖区,地势西北高东南低,北部和西部分别为燕山山脉和太行山脉,南部和东南部为山前倾斜平原,由桃峪口、高崖口、德胜口、南口等众多沟口的冲洪积扇相互连接而成。全区总面积 1 343.5 km<sup>2</sup>,山区和平原区面积各占 59% 和 41%,工农业和人口主要分布于平原区。

平原区第四系沉积物较为发育,含水层自山前向南部和东南部过渡特征明显(见图 1、图 2)。地下水主要接受山区侧向径流、降水入渗、河流入渗及农业灌溉入渗补给,自西北向东南径流,局部由于人工开采水流发生汇集(见图 1),人工开采与侧向流出是该区地下水最重要的排泄方式,地下水根据含水层介质颗粒变化情况可将平原区大致分为四个单元: I 为分布于北流村、南口等西北山前地带的 2~3 层砂卵石层单元, II 为分布于昌平县城一带的单层砂卵石层单元, I、II 单元的含水层渗透性较好,是该区地下水最主要的垂向补给区; III 为东北部山前、平原区中部及马池口一带的多层砂卵石层夹少数砂层的单元,该单元渗透性较 I、II 稍差;

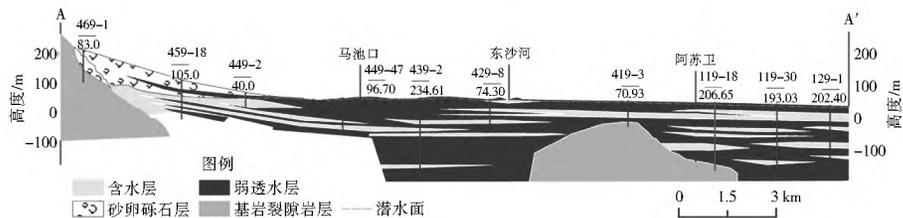


图 2 A-A' 水文地质剖面图

Fig. 2 Hydrogeological cross-sectional view of A-A'

随着社会经济的快速发展,昌平区近年的污水排放量急剧增加,但污水处理设施相对滞后,每年约有  $0.5 \times 10^8 \text{ m}^3$  污水未经处理直接排入河道,造成地表水体严重污染,甚至引起地下水水质恶化<sup>[8]</sup>。据报道,昌平区西北、北部及百善一带地下水总硬度较高,硝氮在西北部和北部地区出现超标,南部部分地区存在氨氮超标现象,小汤山一带由于地质构造等原因氟化物浓度较高<sup>[8,11]</sup>。

## 1.2 采样及分析

本次研究共对区内 19 眼浅层监测井水质进行了采样分析,各监测井井深均小于 150 m,采样点覆盖了研究区的山前地带、溢出带和冲洪积平原地带(见图 1)。由于样品运输过程中 pH 值、TDS、水温会随时间发生改变,因此采用便携式水质分析仪对这些指标进行现场检测,其他指标由北京市水环境检测中心在样品采集后的 24 h 内完成检测。本次研究中的水质检测指标共 27 项,包括 pH 值、氯化物、硫酸盐、TDS、总硬度、锰、锌、硝酸盐、亚硝酸盐、氨氮、氟化物、铜、挥发酚、高锰酸钾指数、氰化物、汞、砷、镉、六价铬、铅、阴离子表面活性剂、铁,以及色度、肉眼可见颗粒物、嗅和味、水温等。

## 1.3 研究方法

本文采用的多元统计分析方法包括主成分分析、模糊聚类分析及相关分析,其中主成分分析用于去除水质变量间的重叠信息,提取主要影响因子,模糊聚类分析根据提取因子计算各监测井水质的相似性,识别水质成因类别,相关分析通过计算提取因子间的关联度,识别其在水质演化过程中的相互联系,并结合水文地质条件及水化学理论探讨这些联系的水文地质意义,分析地下水污染形成的自然及人为影响过

程,进而确定模糊聚类结果的实际水文地质意义。各方法简介如下。

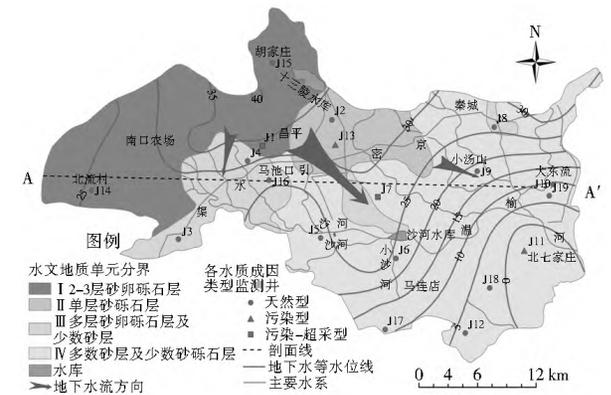


图 1 昌平山前平原水文地质单元及监测点布设  
Fig. 1 Hydrogeological units and location of monitoring wells in Changping District

程,进而确定模糊聚类结果的实际水文地质意义。各方法简介如下。

主成分分析是一种通过线性变换从多个变量中选出少数几个重要变量的多元统计分析方法,该方法能够有效识别水质变量中的信息重叠,减少不必要信息干扰<sup>[12]</sup>,对于筛选水化学和人为影响的水质指标具有较好效果<sup>[13]</sup>;模糊聚类分析是一种基于模糊数学理论的聚类分析方法,其核心思想是根据类间相关性将相似度最高的类结合为一类,如此反复,直至所有分类聚合为一类<sup>[14]</sup>,整个聚类过程会形成一个基于置信水平的动态聚类,结合客观条件选取适当的置信水平,即可获得模糊聚类结果;相关分析法是一种研究变量间依存关系的统计学方法,根据变量间的相关性计算,探讨其关联方向及关联度,进而揭示复杂现象的发展规律<sup>[15]</sup>。

## 2 多元统计分析结果

### 2.1 主成分分析结果

从采样结果来看,浅层地下水的感官性指标(色度、肉眼可见颗粒物、嗅和味、水温)均未出现异常,挥发酚、铜、镉、铅四项指标低于检出限,对水质影响可忽略不计,因此选取余下 19 项指标进行主成分分析,得到如表 1 所示的旋转成份矩阵。

主成分分析共提出 5 个主要成分,成份 1 主要与氯离子、总硬度、TDS、阴离子表面活性剂、pH 值五项指标相关,总方差为 38.002%;成份 2 主要与氨氮相关,总方差为 16.520%;成份 3 主要与汞、亚硝酸盐、硝酸盐三项相关,总方差为 11.848%;成份 4 和成份 5 分别于砷和锌相关,总方



硝酸盐污染主要来源于生活污水、化粪池泄漏,而农业区则主要来源于化肥的大量施用<sup>[16]</sup>。已有研究表明<sup>[17]</sup>,若硝酸盐来源于氨氮氧化或者含氮有机物分解,则硝酸盐与 pH 呈负相关关系。本研究区的氮污染包括硝酸盐、亚硝酸盐及氨氮三种形式,主要分布在 J1、J11、J13 等处。从土地利用类型来看,J1 和 J13 处均为主要的居民用地,因此这两个地区地下水硝酸盐污染均与生活污水、化粪池泄漏有较大关系。从相关性分析结果可知,硝酸盐与总硬度、TDS、氯化物、亚硝酸盐、阴离子表面活性剂、汞呈极显著正相关关系,与 pH 值呈显著负相关。由此判定,J1 和 J13 的一部分硝酸盐来源于氨氮氧化或者含氮有机物分解。此外,氨氮在包气带中的迁移主要受吸附作用影响,通常被滞留于土壤表层,并不随水分向下迁移<sup>[18]</sup>,而 J1 和 J13 的采样深度分别为 60 m 和 70 m,因此 J1 和 J13 处的硝酸盐并非来源于地表下渗氨氮的氧化,而是由含氮有机物矿化形成的氨氮经硝化而来。

亚硝酸盐超标情况仅出现于 J13 处,且亚硝酸盐与硝酸盐存在极显著正相关关系,说明亚硝酸盐的产生与硝酸盐形成过程存在较密切的联系。通过前述硝酸盐成因分析及氮素的硝化规律可推测该处的亚硝酸盐污染来源于含氮有机物的分解。而之所以亚硝酸盐仅在 J13 处出现,未在 J1 处出现,是因为 J13 处为昌平县城所在地,地下水承载的地表污染物输入负荷较 J1 处更大,亚硝酸盐在氮素的转化过程中形成积累。

氨氮污染出现在冲洪积扇平原下游的 J11 处,而且氨氮与其他水质指标相关性低,表明其形成过程较为独立。地下水位监测发现,J11 处地下水埋深近 40 m,表层氨氮由于吸附作用影响不可能迁移到达地下水水面,由此可知该处地下水中的氨氮来源于有机质矿化。从水文地质条件看,J11 地处冲洪积平原下游,弱透水体较 J1 和 J13 处多(见图 2),水化学环境较为厌氧,矿化产生的氨氮不能进一步硝化而产生积累。

总之,昌平区浅层地下水氮污染主要来源于生活污水、化粪池泄漏液中含氮有机物的分解,氮素的呈现形式与具体的水文地质条件及污染物输入量有关。

### 3.2 总硬度和 TDS

总硬度和 TDS 超标现象主要出现在 J1 和 J7 两处,分布范围一致,且二者具有极显著正相关关系( $p < 0.01$ ),二者浓度的升高主要是受近年来人类活动加剧的影响<sup>[19]</sup>,包括地表污染物入渗及地下水长期过量开采导致的水动力场和水化学场改变的影响<sup>[20]</sup>。

近年来昌平区一直是承接北京市中心城区产业和人口转移的重要地区,环境负荷显著增加,地下水污染物潜在输入量明显增大。从表 2 可知,总硬度、TDS 均与氯离子呈极显著正相关关系,而前人研究表明北京平原区山前地下水氯离子浓度升高是人为输入的结果<sup>[21]</sup>,氯离子是一种迁移性极强的离子,下渗过程中很少因吸附而滞留于包气带中,也不会发生化学反应而改变其质量和价态,故其浓度变化可作为地表污染物对地下水污染情况的重要指示。由此可知研究区地表污染物下渗是地下水总硬度和 TDS 升高的重要原因。通常地表污水中含有较多酸、碱、盐类等物质,这些物质在包气带运移过程中会通过化合分解、离子交换等一系反应

将钙镁矿物从土壤中溶解或置换出来,进而造成地下水总硬度和 TDS 升高。此外,相关分析表明,总硬度与硝酸盐具有极显著正相关关系,室内土柱试验也已证实氮素迁移转化会改变地下水中的酸碱条件,进而促进钙镁矿物溶解,使得总硬度和 TDS 升高<sup>[22]</sup>,由此可知 J1 处总硬度和 TDS 的升高与硝酸盐污染也存在一定关系。

地下水过量开采是研究区近年来地下水总硬度和 TDS 升高的又一重要影响因素。持续多年的干旱使得昌平区水资源极为匮乏,而工农业及居民用水量却在不断攀升,水资源供给主要依靠超采地下水,由此造成地下水位的持续下降。长期超采地下水会引起地下水水动力条件的改变,加速盐分及其他污染物的迁移和污染。水位下降使得含水层厚度减小,地下水对污染物的稀释作用减弱,水体的污染承载能力下降<sup>[20]</sup>。此外,水位下降还会导致含水层的水文地球化学环境及水环境均衡系统发生改变,促进污染物与包气带及含水层介质发生酸性溶滤、碳酸溶滤、盐效应及盐污染等一系列水文地球化学作用,导致介质中交换性钙镁、钙镁易溶盐及难溶盐由固态向水中转移,进而使得地下水总硬度和 TDS 浓度升高。

## 4 水质影响类型划分

综合前文,模糊聚类结果分别代表了地下水水质的四种形成过程:第一聚类代表含氮有机污染物矿化形成的污染;第二聚类代表含氮有机污染物经矿化和硝化形成的污染;第三聚类代表污染及地下水超采综合作用形成的污染;第四聚类的地下水水质受人类活动影响较小,为天然型地下水。

第一聚类和第二聚类均为污染成因地下水,其区别在于不同水文地质条件下污染物转化程度不同,因此将研究区浅层地下水水质进一步划归为三类,即污染型(包括第一聚类和第二聚类)、污染超采型(第三聚类)、天然型(第四聚类)。其中污染型代表地下水污染来源于地表污染物下渗,污染超采型代表地下水污染由地表污染物与地下水超采引起的水化学、水动力条件改变两方面共同造成,天然型是指水质受自然因素控制,优劣水平与人为因素无关的地下水。

从空间分布来看(见图 4),昌平平原大部分地区地下水属于受人类活动影响较小的天然型地下水,该类地下水除小汤山(J9)局部存在氟化物超标外,其他地区均满足地下水水质标准;污染型地下水主要分布于昌平县城(J13)及东二旗(J11)等人口和工业聚集区,分布范围与地表污染物载荷具有显著相关性;污染超采型地下水则分布于七间房(J1)和百善(J7)地区,该区人类活动较为剧烈,地表污染物载荷较大,同时处在地下水超采影响范围内,是污染与超采共同作用区。

## 5 结论

昌平平原区浅层地下水水质总体较好,78.95%符合地下水质量标准(GB/T 14848-1993)中的Ⅲ类水质标准,主要水质影响因素为氮素、总硬度、TDS 和氟化物,其中:氮素主要来源于地表输入的含氮有机物分解,其具体污染形式与实际水文地质条件及污染输入量有关;总硬度和 TDS 污染则来源于污染物下渗直接造成的污染和迁移转化形成的污染,以及地下水超采带来的水动力条件及水化学条件改变诱

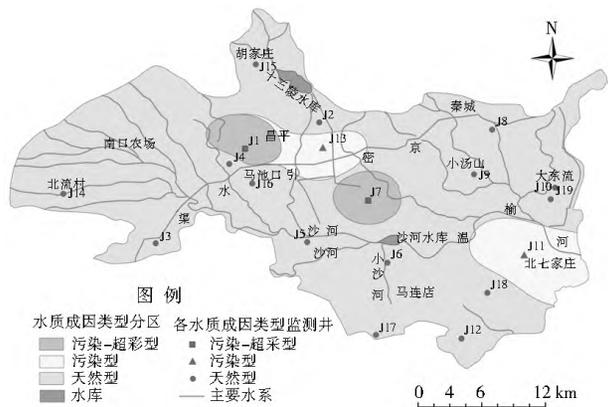


图 4 地下水水质成因类型分区

Fig. 4 Partition of groundwater quality genetic type

发的一系列水文地球化学反应造成的污染。根据污染的具体来源可将研究区浅层地下水划分为三大类型: 即污染型(包括第一聚类和第二聚类)、污染-超采型(第三聚类)、天然型(第四聚类)。

鉴于昌平区当前地下水的污染特征及发展趋势, 建议今后工作中重点对氮素的垂向分布特征及迁移转化规律进行研究, 此外昌平区应严格管控污染物排放, 合理配置水资源, 优化地下水开发利用方式, 以实现地下水的可持续利用, 减少地下水超采引起的各种次生环境地质问题。

参考文献(References):

[1] 周磊, 王翊虹, 林健, 等. 北京平原区地下水水质监测网优化设计[J]. 水文地质工程地质, 2008, 35(2): 1-9. (ZHOU Lei, WANG Yi hong, LIN Jian, et al. Optical design of monitoring network of groundwater quality in the Beijing Plain[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2008, 35(2): 1-9. (in Chinese))

[2] 范庆莲, 戴岚, 宋海波, 等. 北京市水资源公报[Z]. 2011. (FAN Qinglian, DAI Lan, SONG Hai bo, et al. Beijing Water Resources Bulletin[R]. 2011. (in Chinese))

[3] Zghibi A, Merzougui A, Zouhri L, et al. Understanding groundwater chemistry using multivariate statistics techniques to the study of contamination in the Korba unconfined aquifer system of Cap Bon (North east of Tunisia) [J]. Journal of African Earth Sciences, 2014, 89: 1-15.

[4] Mrazovac S, Vojinovi c Miloradov M, Mati c I, et al. Multivariate statistical analyzing of chemical parameters of groundwater in Vojvodina[J]. Chemie der Erde Geochemistry, 2013, 73(2): 217-225.

[5] Raiber M, White P A, Daughney C J, et al. Three dimensional geological modelling and multivariate statistical analysis of water chemistry data to analyse and visualise aquifer structure and groundwater composition in the Wairau Plain, Marlborough District, New Zealand[J]. Journal of Hydrology, 2012, 436: 13-34.

[6] Gler C, Kurt M A, Alpaslan M, et al. Assessment of the impact of anthropogenic activities on the groundwater hydrology and chemistry in Tarsus coastal plain (Mersin, SE Turkey) using fuzzy clustering, multivariate statistics and GIS techniques [J]. Journal of Hydrology, 2012, 414: 435-451.

[7] Kung H, Ying L, Liu Y C. A complementary tool to water quality

index: fuzzy clustering analysis[J]. Water Resources Bulletin. 1992, 28(3): 525-533.

[8] 田岳林, 杨永强, 李奋勇, 等. 地下水水源环境保护规划及污染防治对策[A]. 2011 年全国给水排水技术信息网年会暨技术交流会论文集[C]. 中国内古乌海, 2011. (TIAN Yue lin, YANG Yong-qiang, LI Fei-yong, et al. Groundwater sources environmental protection planning and pollution prevention and control strategy[A]. Proceedings of National Water Supply and Drainage Technology Information Network Annual Conference & Technical Seminar in 2011[C]. Wuhai of Inner Mongolia, China, 2011. (in Chinese))

[9] 张宝龙, 陆苏. 昌平区地下水水质评价[J]. 北京水务, 2013(2): 32-34. (ZHANG Bao long, LU Su. Evaluation of groundwater quality of Changping District[J]. Beijing Water, 2013(2): 32-34. (in Chinese))

[10] 石红梅. 北京市昌平区农村安全饮水改造实例简介[J]. 城镇供水, 2008(2): 87-89. (SHI Hang mei. Brief introduction of safe drinking water in rural transformation of Changping District[J]. City and Town Water Supply, 2008(2): 87-89. (in Chinese))

[11] 杨忠山, 范庆莲. 昌平区地下水资源开发利用分析及合理利用对策[J]. 北京水务, 2007(1): 37-39. (YANG Zhong-shan, FAN Qing-lian. Analysis of exploitation and utilization of groundwater resource in Changping District and counter measures of its rational utilization[J]. Beijing Water, 2007(1): 37-39. (in Chinese))

[12] Gler C, Thyne G D, McCray J E, et al. Evaluation of graphical and multivariate statistical methods for classification of water chemistry data [J]. Hydrogeology Journal, 2002, 10(4): 455-474.

[13] Zhang B, Song X, Zhang Y, et al. Hydrochemical characteristics and water quality assessment of surface water and groundwater in Songnen plain, Northeast China[J]. water research, 2012, 46(8): 2737-2748.

[14] H S Xu, Z X Xu, W Wu, et al. Assessment and spatiotemporal variation analysis of water quality in the Zhangweinan river basin, China [J]. Procedia Environment Sciences, 2012, 13: 1641-1652.

[15] 何晓群. 多元统计分析[M]. 3 版. 北京: 中国人民大学出版社, 2012. (HE Xiao qun. Multivariate statistical analysis[M]. 3rd Edition. Beijing: China Renmin University Press Co. LTD, 2012.

[16] Devic G, Djordjevic D, Sakan S. Natural and anthropogenic factors affecting the groundwater quality in Serbia[J]. Science of the Total Environment, 2014, 468: 933-942.

[17] Kim K, Rajmohan N, Kim H J, et al. Assessment of groundwater chemistry in a coastal region (Kunsan, Korea) having complex contaminant sources: a stoichiometric approach[J]. Environmental geology, 2004, 46(6-7): 763-774.

[18] 李波, 杨欣. 渗滤液中氨氮在土壤和地下水中心迁移转化实验[J]. 环境卫生工程, 2006, 14(2): 21-22. (LI Bo, YANG Xin. Transfer and transformation of NH<sub>3</sub>-N from leachate on soil and groundwater[J]. Environmental Sanitation Engineering, 2006, 14(2): 21-22. (in Chinese))

(下转第 338 页)

- 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度评价[J]. 地质灾害与环境保护, 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 Chuahua, 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))