

Field test of moisture migration in vadose zone under heterogeneity

LI Yong-tao^{1,2}, WANG Wen-ke², XIAO Jian-ying³,
YANG Xiao-ting²

(1 College of Chemistry and Chemical Engineering, Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, China; 2 College of Environmental Sciences and Engineering, Chang'an University, Xi'an 710054, China; 3 College of Science, Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, China)

Abstract: The paper is engaged in a field test of moisture migration in vadose zone under the heterogeneous condition in the Weihe(Shaanxi) flood-plain. The reason why we have chosen the topic is that the evolution of a river may exert serious consequential effects on the groundwater change, the water quality and even the ecological environment along the entire river reach. It is for such purposes, we have dug up some measuring pits as large as 7 m × 1 m × 2.8 m and taken them as our study profile. For the convenience of observation, we have installed a MP-917 Time Domain Reflectometry(TDR) and a mercury manometer to observe the potential pressure and the moisture content in correspondence with the different properties of lithology and depth respectively. And, then, we have done a five-day infiltration test by using our own-made Bauwer Ooze water meter. Though it is difficult to understand the infiltration mechanism for its complexity with the unsaturated zone being heterogeneous with compacted sandwich structure, the field test is comparatively simple about the moisture migration in vadose zone under heterogeneity. In addition, we have also tested the moisture migration regularly under the heterogeneous condition and the relationship between the infiltration speed and water head height by using the above said Ooze water meter. The results of our study show that, the distribution of moisture content is restricted by the lithology permeability in relation to the vadose zone medium and aeration zone structure. The vadose zone doesn't prove to be easy to get saturated due to the presence of aquitard blocked moisture migration. The infiltration speed, which extends with the thickness of the layer, may help to show its the relation with the height of the water head, because the water infiltrated as unsaturated flow above semipervious layer contributes to the formation of the upper sluggish water volume. And, therefore, in the process of evaluating the water resources formerly, it is not easy to judge exactly the recharge of the river water to the groundwater, for it is necessary to emphasize the role of semipervious layer as the head boundary or the rain type flowing boundary. Thus, it can be seen that the results of our field test can be taken as an exponential support for the problem of disconnection between the river and the groundwater, thus providing a scientific basis for the recoverable resource evaluation and sustainable maintenance of the ecological function of the river water and the surrounding groundwater sources.

Key words: environmental engineering; moisture migration; seepage; floodplain; weihe river

CLC number: F205 **Document code:** A
Article ID: 1009-6094(2012)03-0134-04

文章编号: 1009-6094(2012)03-0137-05

莱州湾东岸地下水硝酸盐空间
变异特征研究*

刁美娜^{1,2}, 温小虎¹, 张志东¹, 王 德¹, 高 猛¹
(1 中国科学院烟台海岸带研究所, 山东烟台 264003;
2 中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘 要: 应用经典统计学和地统计学对莱州湾东岸地下水 NO₃⁻ 质量浓度进行分析, 采用 Kriging 方法对未观测点进行估值, 分析研究区不同区域 NO₃⁻ 质量浓度的空间变异特征。同时, 利用地理信息系统与 Surfer 软件分析研究区土地利用类型和 NO₃⁻ 质量浓度之间的关系。结果表明: 1) 莱州湾东岸地区地下水 NO₃⁻ 质量浓度平均值为 118.51 mg/L, 变异系数为 0.80, 表现为中等强度变异; 2) 研究区地下水 NO₃⁻ 质量浓度的变异函数理论模型符合高斯模型, 块金值/基台值为 41.5%, 表现为中等程度的空间相关性; 3) 不同土地利用类型中, 耕地地下水中硝酸盐质量浓度平均值(136.09 mg/L)最高, 其次是城镇用地(89.15 mg/L), 水产养殖区(30.32 mg/L)最低, 其中耕地超标率为 81.25%, 城镇用地超标率为 76.92%, 水产养殖区均未超标。农业生产过量使用化肥和城镇生活中的生活生产废水大量排放是造成地下水硝酸盐质量浓度过高的主要原因。而水产养殖区由于受人类生活、生产与耕作影响较少, 地下水硝酸盐质量浓度相对较低。

关键词: 水文学; 地下水; 硝酸盐; 空间变异性; 土地利用类型
中图分类号: X523 **文献标识码:** A
DOI: 10.3969/j.issn.1009-6094.2012.03.033

0 引 言

地下水是水资源的重要组成部分, 是农业灌溉、工矿和城市的重要水源之一^[1]。地下水一般水质良好而无需太多的处理, 日益取代地表水成为重要的饮用水源^[2]。然而, 由于城市化和工业生产的高速发展, 大量未经处理或未达标排放的生活和工业污水无序排放, 致使地下水污染日益严重。地下水本身循环更新慢, 一旦受到某些物质污染则难以处理, 硝酸盐即是其中一种。近年来, 地下水硝酸盐浓度增加已成为许多地区普遍存在的现象^[3-5], 地下水硝酸盐污染已成为全球性的问题^[6]。许多国家先后于 20 世纪 90 年代开展了地下水硝酸盐污染、影响因素及控制对策方面的研究^[7]。

莱州湾地处渤海湾南部, 是我国自然灾害最为严重的地区, 随着经济快速发展和人口迅速增加, 对水资源的需求不断加大。自 20 世纪 50 年代以来, 莱州湾沿岸大规模开采地下水, 致使地下水严重超采从而引发了海水入侵、水体污染等一系列水环境问题。较多学者对该区水环境问题进行了研究, 内容涉及海水入侵对土地覆被的变化^[8]、对生态环境的影响^[9]、平原海水入侵现状及趋势^[10], 以及海水入侵区地下水的化学特征^[11]等。然而, 以往研究多侧重于海水入侵现状及

* 收稿日期: 2011-12-07
作者简介: 刁美娜, 硕士研究生, 从事地理信息系统、水环境数值模拟研究; 温小虎(通信作者), 副研究员, 博士, 从事环境科学、水资源与水环境研究, xhwen@yic.ac.cn。
基金项目: 国家自然科学基金项目(41001013); 中国科学院知识创新项目(KZCX2-YW-224-04)

防治对策,对于莱州湾东岸地区地下水中硝酸盐的研究较少。本文以莱州湾东岸地区为研究区域,在大量调查、取样、分析的基础上,对地下水硝酸盐进行研究,利用 ArcGIS 地统计模块,结合区域土地利用情况分析莱州湾东岸区域地下水中硝酸盐污染现状,以为区域水环境保护和治理提供依据。

1 研究区概况

莱州湾位于山东省北部,北纬 36° 25′—37° 47′,东经 118° 17′—120° 45′,总面积 1.01 × 10⁴ km²。莱州湾海岸低平,虎头崖东北称莱州湾东岸,以西为南岸,岸长约 200 km,平原宽 10~50 km。

研究区位于山东半岛的西北部,莱州湾的东岸,主要包括莱州市,北起后吕,南到小刘家村。该区属于暖温带季风性大陆气候区,四季分明,多年平均气温在 11.3~12.3℃,平均降水 658 mm。降水多集中在夏季,占全年降水量的 62%^[12]。莱州湾东岸海岸带隶属渤海拗陷的边缘部分,在山东半岛构造隆起区内是一个相对独立的比较特殊的地质单元。虎头崖以东为复式沙质海岸,沿岸发育有滩脊、连岛沙坝和泻湖,是由古黄土质侵蚀海岸演变而成的泻湖—沙坝堆积平原海岸;虎头崖以西为粉沙淤泥质海岸。莱州湾东岸晚第四纪表现为陆地系统与海洋系统间的自然相互作用。作为古地理标识与地质历史记录,海岸带范围相当于第四纪末期以来海面起伏波动交替性地被淹没或被暴露的地带。

近 30 年来,随着经济快速发展和人口的迅速增长,城市化加快,水资源需求量猛增。由于地表水资源不足(地表水为 10~15 万 t/km²),生产、生活用水主要依赖于地下水。由于过度开采,地下水位以 1~3 m/a 的速度迅猛下降。由于海水入侵,地下水逐渐变成,地下淡水水质恶化,大量机井面临报废,可利用的地下淡水资源量减少,从而使原本贫乏的水资源更加匮乏^[13]。莱州湾成为我国地下水环境最为严重的区域之一^[14]。

2 样品采集测试及研究方法

2.1 样点数据及处理

沿莱州湾东部海岸线向内延伸 10 km 为研究区域。于 2009 年 8 月依托地下水长期观测孔、饮用水井、试坑进行地下水采样。取样时用 GPS 定位,共取水样 47 个,见图 1。采用紫

外分光光度计测定 NO₃⁻ 质量浓度。

2.2 地统计方法

地统计(Geostatistics)是在大量理论研究的基础上逐渐形成的一门新的统计学分支。它是以区域化变量为基础,借助变异函数,研究既具有随机性又具有结构性的自然现象的一门学科。

2.2.1 区域化变量

当一个变量呈现一定的空间分布时,称之为区域化变量,它反映了区域内的某种特征或现象,且是与位置有关的随机变量。在实际分析中,常采用抽样的方式获得区域化变量在某个区域内的值。

区域化变量具有两个显著特点:随机性和结构性。首先,区域化变量是一个随机变量,它具有局部的、随机的、异常的特征;其次,区域化变量具有一定的结构特点,即自相关性。一般而言,两个点间距越小相关性越好,这种自相关性反映了这种变量的某种连续性和关联性,体现了其结构性的一面。

2.2.2 变异函数

变异函数是地统计学研究区域化变量变异特征的基本工具,也是地统计学两大主要内容之一^[15]。变异函数的计算公式为

$$\gamma(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [z(x_i) - z(x_i + h)]^2 \quad (1)$$

式中 $\gamma(h)$ 为变异函数; h 为步长,即为了减少各样点组合对的空间距离个数而对其进行分类的样点空间间隔距离; $N(h)$ 为间隔距离为 h 时的样点对数; $z(x_i)$ 和 $z(x_i + h)$ 分别为变量 z 在空间位置 x_i 和 $x_i + h$ 上的取值。

步长 h 的大小对变异函数有很大的影响。若步长过大,则小尺度上的自相关关系将会被掩盖;若其过小,则会出现许多空的分类组,或者使得分类组包含的样本数太少而不能反映实际情况。

数据统计及相关性分析采用 SPSS 13.0 软件。用地统计学 GS+ 进行半方差函数的分析以及模型选择,在 ArcGIS 的 Geostatistical Analyst 地统计模块支持下,采用普通克里金(Ordinary Kriging)插值,得到研究区地下水 NO₃⁻ 质量浓度空间分布图。

3 结果及分析

3.1 地下水 NO₃⁻ 质量浓度的统计分析

变异函数的计算一般要求数据符合正态分布,否则可能存在比例效应^[16]。使用 SPSS 的单样本克列莫格洛夫-斯米诺夫(One-sample Kolomogorov-Seminov (K-S))检验对地下水 NO₃⁻ 质量浓度的分布类型进行正态性检验。结果表明,NO₃⁻ 质量浓度样本符合正态分布(表 1)。

参照世界卫生组织水质标准与国家生活饮用水硝酸盐质量浓度卫生标准,将研究区地下水 NO₃⁻ 质量浓度划分为 4 级,见表 2。研究区地下水 NO₃⁻ 质量浓度质量介于 8.35~451.36 mg/L,平均质量浓度 118.51 mg/L,变异系数为 0.80,属于中等强度变异。根据饮用水硝酸盐质量浓度卫生标准,所采水样中 I 类水占 23.40%,II 类水占 23.40%,III、IV 类水分别占 19.15% 和 34.05%,其中达到国家饮用水标准(88.6 mg/L)的占 46.80%。

综合以上情况可知,研究区地下水 NO₃⁻ 质量浓度较高。

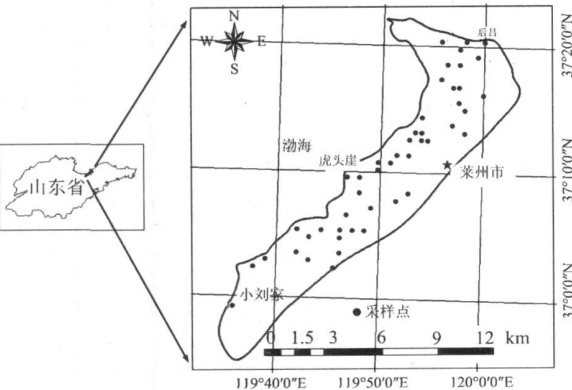


图 1 研究区示意图及采样点分布

Fig. 1 Study area and groundwater sampling sites

这些统计值只能在一定程度上反映样本总体, 而不能定量描述地下水中 NO_3^- 质量浓度的随机性和不规则性。要进行量化, 分析研究区地下水中 NO_3^- 空间分布的结构特征和统计学的随机特征, 必须进行空间变异结构分析^[17]。

3.2 地下水 NO_3^- 的空间变异结构分析

采用半方差函数分析检验研究区地下水 NO_3^- 的空间变异性。首先计算出 $\gamma(h) - h$ 散点图, 分别用不同类型的模型进行拟合, 得到模型参数值。本文使用 GS+ 5.0 软件计算半方差函数。经理论模型的最优拟合发现, 最佳拟合模型为高斯模型(Gaussian model), 结果见表 3。

通过对半方差函数进行分析, 得到 3 个参数——块金值、变程与基台值。块金值代表随机变异量。理论上, 当采样点间距离为 0 时, 半变异函数值应为 0, 但由于存在测量误差和空间变异, 使得两采样点非常接近时, 它们的半变异函数值不为 0, 即存在块金值^[18]。变程是变异函数达到基台值时的间隔距离, 其反映属性因子空间自相关范围的大小, 它与观测尺度以及在取样尺度上影响地下水 NO_3^- 的各种生态过程相互作用有关^[19]。当取样间距大于变程时, 区域化变量的空间相关性消失。基台值代表变量空间变异的结构性方差。由于块金值与基台值受自身因素和测量单位的影响较大, 因而采用块金值与基台值之比表示随机性因素引起的空间异质性占系统变异的比值, 称为空间相关性。若该比值高, 说明随机性因素引起的空间异质性起主要作用; 反之, 则说明结构性因素引起的空间异质性程度起主要作用。如果比值小于 25%, 说明变量具有强烈的空间相关性; 在 25% ~ 75% 之间, 变量具有中等的空间相关性; 大于 75% 时, 变量空间相关性很弱^[20]。即比值越大, 表示样本间的变异更多是由随机因素引起的。

由表 3 可知, NO_3^- 的块金值为大于 0 的正数。因此可认为存在由采样误差、短距离变异、随机和固有变异引起的各种正基底效应^[21]。块金值与基台值之比为 41.5%, 表现为中等程度的空间相关性, 说明 NO_3^- 的空间变异性是由随机因素(农业化肥污染、工业废水和生活废水污染以及污水回灌) 与结构因素(大气沉降, 固体废弃物的淋降) 共同作用的结果。

3.3 地下水硝酸盐质量浓度空间分布特征

Kriging 插值方法就是利用变异函数与原始数据对采样点的区域化变量的取值进行线性无偏最优估计。为了更直观地反映土壤水分的分布特征, 利用 Kriging 方法在 Surfer 软件中绘制了研究区地下水硝酸盐质量浓度的等值线图。插值结果见图 2。

从整体上看, 研究区地下水的硝酸盐质量浓度普遍较高, 空间分布表现为带状分布格局, 大部分地区硝酸盐质量浓度超标。47 个采样点中 53.2% 采样点的硝酸盐质量浓度超过了我国饮用水健康标准(88.6 mg/L), 造成地下水硝酸盐严重污染。局部上, 有两个主要的地下水硝酸盐质量浓度高值中心。其一是东小宋—娄家—栾家—岳里地区, 该区域内硝

酸盐质量浓度大于 132.9 mg/L, 最高超过 450 mg/L; 其二是水南村—三教村—淇水村地区, 区域内 NO_3^- 质量浓度均超过 II 类水标准, 最高超过 220 mg/L。两个区域均为重要的农业区, 大量施用化肥导致地下水硝酸盐质量浓度过高。

硝酸盐是自然存在的离子, 是氮循环的一部分, 自然界存在的硝酸盐在地下水中通常较少。地下水硝酸盐污染有点源和面源两种。点源污染主要包括城市污水、工业废水、生活污水以及一些金属矿排出的废水等; 面源污染主要包括农业中使用污水灌溉, 大量施用氮肥以及施用有机肥等。农耕区过多使用化肥, 其中 12.5% ~ 45% 的氮从土壤中流失并污染了地下水^[22-23]。研究结果表明, 不同土地利用类型对地下水硝酸盐质量浓度影响不同^[24-25]。因此, 本文将研究区土地利用类型与 NO_3^- 质量浓度分类相结合, 综合考察研究区土地利用与硝酸盐质量浓度的关系。研究区主要土地类型为耕地、城镇用地与水产养殖区。各地类不同水质等级的采样点数目统计结果见表 4。

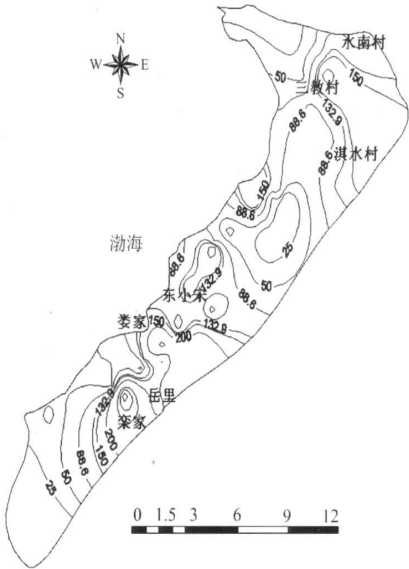


图 2 NO_3^- 质量浓度空间分布图

Fig. 2 Spatial distribution of NO_3^- mass concentration

表 2 NO_3^- 质量浓度等级划分

Table 2 Concentration grading for NO_3^- mass concentration

等级	I	II	III	IV
NO_3^- 质量浓度/ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	< 50	50~ 88.6	88.6~ 132.9	> 132.9

表 3 地下水 NO_3^- 的半方差模型及参数值

Table 3 Semivariogram of NO_3^- concentration and parameter values

理论模型	块金值	变程/m	基台值	块金值/基台值	R^2
Gaussian	0.655	31 470	1.578	0.415	0.843

表 1 研究区地下水 NO_3^- 质量浓度的描述性统计分析 & 正态分布检验

Table 1 Descriptive statistics and K-S test of NO_3^- mass concentration of groundwater

采样点数	最小值/ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	最大值/ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	平均值/ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	中值/ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	标准差	变异系数	偏度	峰度	分布类型
47	8.35	451.36	118.51	99.58	94.64	0.80	1.383	4.96	N

依据采样点周边的土地类型与表 4 统计结果, 分别统计分析土地利用类型对地下水硝酸盐质量浓度的影响, 结果见图 3。图 3 表明, 耕地地下水中硝酸盐质量浓度平均值最高, 其次是城镇用地, 水产养殖区最低。32 个耕地采样点硝酸盐平均值为 136.09 mg/L, 超过地下水 NO₃⁻ 质量浓度 IV 类水标准值, 有 26 个采样点超标, 超标率为 81.25%, 其中有 12 个采样点严重超标。城镇用地采样点硝酸盐质量浓度平均值为 89.15 mg/L, 超过国家生活饮用水标准(88.6 mg/L), 13 个采样点中有 10 个超标, 超标率为 76.92%, 其中有 6 个为严重超标。水产养殖区中硝酸盐平均质量浓度为 30.32 mg/L, 且均未超标。研究区土地利用以耕地为主, 而耕地由于大量施用氮肥、有机肥(1.26×10⁵ t/a^[26])等致使 NO₃⁻ 由土壤流失到地下水; 研究区城镇中, 由于人类生活生产产生的城市污水、生活污水、工业废水(8.65×10⁷ t/a^[26])等含氮废水排放到地下水中, 导致水中硝酸盐质量浓度超标; 而水产养殖区由于受人类生活、生产与耕作影响较少, 地下水中 NO₃⁻ 质量浓度相对较低。

硝酸盐污染是地下水的主要污染之一, 为保证供水安全和有效治理污染的地下水水体, 确定硝酸盐中氮的主要来源尤为重要。由于不同氮源产生的 NO₃⁻ 具有不同的同位素组成, 因此可利用硝酸盐中 N 同位素区分硝酸盐的来源。莱州湾东岸地区地下水硝酸盐污染较为严重, 未来可利用硝酸盐中 N 同位素示踪的方法来确定地下水中硝酸盐来源。

4 结 论

以莱州湾东岸为研究区, 选取 NO₃⁻ 作为评价因子进行地统计分析, 利用 ArcGIS 进行插值, 绘制 NO₃⁻ 质量浓度的空间分布图, 得到以下结果。

1) NO₃⁻ 在一定的区域范围内具有空间结构特征, 块金值与基台值之比为 41.5%, 受结构性因素和随机性因素共同作用, 表现为中等程度的空间相关性。

表 4 土地利用类型图、NO₃⁻ 质量浓度分类与采样点数目统计结果
Table 4 Statistics of land use, NO₃⁻ mass concentration and number of sampling sites

土地利用类型	I	II	III	IV
耕地	1	5	14	12
城镇用地	1	2	4	6
水产养殖区	2	0	0	0

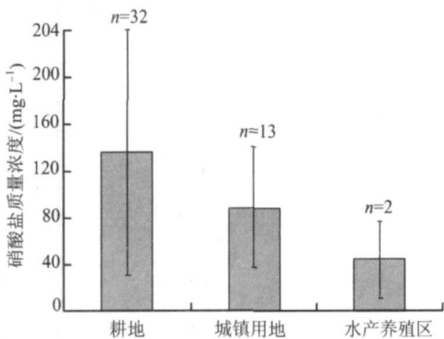


图 3 不同土地利用类型地下水硝酸盐质量浓度比较
Fig. 3 Comparison of NO₃⁻ concentration of groundwater with different types of land use

2) NO₃⁻ 的空间分布表现为带状分布格局, 最大值出现在两个地区: 其一是东小宋—娄家—栾家—岳里地区, 该区域内硝酸盐质量浓度大于 132.9 mg/L, 最高超过 450 mg/L; 其二是水南村—三教村—淇水村地区, 区域内 NO₃⁻ 质量浓度均超过 II 类水标准, 最高超过 220 mg/L。两个区域均为重要的农业区, 生产中过量的使用化肥是造成该区地下水硝酸盐质量浓度过高的主要原因。

3) 由不同土地利用类型下硝酸盐质量浓度平均值结果比较可知, 耕地中硝酸盐质量浓度最高(136.09 mg/L), 其次为城镇用地(89.15 mg/L), 水产养殖区地下水硝酸盐质量浓度最低(30.32 mg/L)。农业生产过量使用化肥和城镇生活中的生活生产废水大量排放是造成地下水硝酸盐质量浓度过高的主要原因。

References(参考文献):

[1] MACHI WAL D, JHA M K, MAL B C. GIS-based assessment and characterization of groundwater quality in a hard-rock hilly terrain of Western India [J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2011, 174(1/2/3/4): 645-663.

[2] ZHOU Yangxiao(周仰效), LI Wenpeng(李文鹏). Groundwater quality monitoring and assessment[J]. *Hydrogeology and Engineering Geology*(水文地质工程地质), 2008(1): 1-11.

[3] OBEIDAT M M, MASSADEH A M, AL-AJLOUNI A M, et al. Analysis and evaluation of nitrate levels in groundwater at Al-Hashimiya area, Jordan [J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2007, 135(1/2/3): 475-486.

[4] JIN Zangfang(金赞芳), WANG Feier(王飞儿), CHEN Yingxu(陈英旭), et al. Nitrate pollution of groundwater in urban area [J]. *Acta Pedologica Sinica*(土壤学报), 2004, 41(2): 252-258.

[5] LIU Qing(刘庆), WANG Jing(王静), SHI Yanxi(石衍玺), et al. On the spatial distribution of heavy metal in the cropland based on GIS [J]. *Journal of Safety and Environment*(安全与环境学报), 2007, 7(2): 109-113.

[6] ZHANG Hong(张洪), WANG Wuyi(王五一), LI Hairong(李海蓉), et al. Review of research on nitrate pollution in groundwater [J]. *Water Resources Protection*(水资源保护), 2008, 24(6): 7-11, 67.

[7] LIU Hongbin(刘宏斌), LI Zhihong(李志宏), ZHANG Yungui(张云贵), et al. Nitrate contamination of groundwater and its affecting factors in rural areas of Beijing Plain [J]. *Acta Pedologica Sinica*(土壤学报), 2006, 43(3): 405-413.

[8] ZHANG Zulu(张祖陆), WANG Lin(王琳). Driving mechanism of land use/coverage change in southern Laizhou Bay [J]. *Scientia Geographica Sinica*(地理科学), 2007, 27(1): 40-44.

[9] YI Huapeng(衣华鹏), ZHANG Pengyan(张鹏宴), BI Jisheng(毕继胜), et al. The influence of seawater intrusion on ecological environment in the eastern coast of Laizhou Bay [J]. *Marine Sciences*(海洋科学), 2010, 34(1): 29-34.

[10] AN Yonghui(安永会), ZHANG Fucun(张福存), JIA Huiying(贾慧颖), et al. Analysis and trend forecast of salt water intrusion in coastal plain of Laizhou Bay—a case study at Guangrao county of Shandong Province [J]. *Environmental Science & Technology*(环境科学与技术), 2009, 32(5): 79-82.

[11] YAO Jing(姚菁), YU Hongjun(于洪军), WANG Shukun(王树昆), et al. The underground water hydrochemical characteristics of seawater invasion area around Laizhou Bay [J]. *Marine Sciences*(海洋

科学), 2007, 31(4): 32-36, 41.

- [12] YI Huapeng(衣华鹏), ZHANG Pengyan(张鹏宴), LI Shitai(李世泰). Remedying local landscape ecology in mud flat in eastern coast of Laizhou Bay[J]. *Marine Sciences*(海洋科学), 2005, 29(10): 32-35
- [13] LIU Xianzhao(刘贤赵). Environmental setting of sea-water intrusion and its effects on agricultural soil and water environment in Laizhou Bay of Shandong Province[J]. *Research of Soil and Water Conservation*(水土保持研究), 2006, 13(6): 18-21.
- [14] YI Liang(易亮), YU Hongjun(于洪军), XU Xingyong(徐兴永). Preliminary study on coastal zone environments and functional zoning in Laizhou Bay[J]. *Coastal Engineering*(海岸工程), 2010, 29(1): 30-39
- [15] WANG Zhengquan(王政权). *Geostatistics and applications in ecology* (地质统计学及其在生态学中的应用) [M]. Beijing: Science Press, 1999.
- [16] ROSSI R E, MULLA D J, JOURNEL A G, et al. Geostatistical tools for modeling and interpreting ecological spatial dependence[J]. *Ecological Monographs*, 1992, 62(2): 277-314.
- [17] LI Xiaoyu(李小昱), LEI Tingwu(雷廷武), WANG Wei(王为). Spatial variability of soil properties and the Kriging method[J]. *The Journal of Northwest Agricultural University* (西北农业大学学报), 2000, 28(6): 30-35.
- [18] TANG Guoan(汤国安). *GIS spatial analysis test tutorial* (ArcGIS 地理信息系统空间分析实验教程) [M]. Beijing: Science Press, 2006.
- [19] WANG Genxu(王根绪), QU Yaoguang(曲耀光), CHENG Guodong(程国栋). Environmental influence caused by the development of water resources in Heihe River basin[J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*(干旱区资源与环境), 1997, 11(4): 8-14.
- [20] CHEN Weiqiang(陈伟强), LIU Guoshun(刘国顺), HUA Yixin(华一新), et al. The spatio-temporal variability of soil nutrients in typical tobacco growing areas of Henan Province based on GIS[J]. *Journal of Henan Agricultural Sciences* (河南农业科学), 2007(11): 70-75.
- [21] GAO Tingting(高婷婷), DING Jianli(丁建丽), HA Xueping(哈学萍), et al. The spatial variability of salt content based on river basin scale: a case study of the delta oasis in Weigan-Kuqa Watershed[J]. *Acta Ecologica Sinica*(生态学报), 2010, 30(10): 2695-2705.
- [22] CHEN Jianyao(陈建耀), WANG Ya(王亚), ZHANG Hongbo(张洪波), et al. Overview on the studies of nitrate pollution in groundwater[J]. *Progress in Geography* (地理科学综述), 2006, 25(1): 34-44
- [23] LIU Xingquan(刘兴权), XU Jingyu(许晶玉), JIANG Lihua(江丽华), et al. Spatial variability and distribution pattern of groundwater nitrate pollution in farming regions of Shandong Province, China[J]. *Journal of Agro-Environment Science* (农业环境科学学报), 2010, 29(6): 1172-1179.
- [24] HU K L, HUANG Y F, HONG L, et al. Spatial variability of shallow groundwater level, electrical conductivity and nitrate concentration, and risk assessment of nitrate contamination in North China Plain[J]. *Environment International*, 2005, 31(6): 896-903
- [25] BABIKER I S, MOHAMED M A A, TERA O H., et al. Assessment of groundwater contamination by nitrate leaching from intensive vegetable cultivation using geographical information system[J]. *Environment International*, 2004, 29: 1009-1017.
- [26] Yantai Municipal Bureau of Statistics(烟台统计局). *Statistical yearbook of Yantai* (烟台统计年鉴) [M]. Beijing: China Statistics Press, 2010

On the spatial nitrate concentration variations in the groundwater of the eastern coast of Laizhou Bay

DIAO Mei-na^{1, 2}, WEN Xiao-hu¹, ZHANG Zhi-dong¹, WANG De¹, GAO Meng¹

(1 Yantai Institute of Coastal Zone Research, Chinese Academy of Sciences, Yantai 264003, Shandong, China; 2 Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: This study is intended to present the research results of our analysis of the NO_3^- concentration variation in the east coast of Laizhou Bay by means of classical statistics and geostatistics. The paper has also investigated the spatial variations of the NO_3^- concentration in different spots of the above said area in hoping to evaluate the situation concerned of the non-observational areas with Kriging method. At the same time, we have also jointly applied the geographic information system with the surfing software to an analysis of the relationship between the concentrations of nitrate and the land use types in the area under study. The results of our research reveal that: (1) the average concentration of NO_3^- in the eastern coast of Laizhou Bay is 118.51 mg/L with the coefficient of variation being 0.8, which can be regarded as a result of moderate-intensity variation. (2) The theoretical variogram model of the groundwater nitrate concentration in the area is a Gaussian model with its nugget/sill of 41.5%, which indicates a medium spatial correlation. (3) In different types of land use, the average content concentration of nitrate proves to be different. The content of nitrate in the farmlands has been found maximal with a value of 136.09 mg/L; the variation order was followed by the urban land, whose average content is 89.15 mg/L; and the content with the aquaculture areas proves to be weakest, only 30.32 mg/L. Of different land use types, the farmland (81.25%) is found with excessive content rate of nitrate concentration, whereas the rate in urban land is 76.92%, except for the aquaculture areas. Comparing the above findings with the specific circumstances of the study area, we have found that the excessive uses of agricultural fertilizers in the farmlands and large amounts of wastewater emission in the urban areas are the main causes leading to the high nitrate content in the groundwater. For example, the nitrate content in the groundwater is found relatively low in aquaculture areas, because of the less impact of human activities on the daily life, production and farming. Thus, it can be concluded that there exists a very closely relation between the groundwater nitrate concentration and land use type.

Key words: hydrology; groundwater; nitrate; spatial variability; land use

CLC number: X523

Document code: A

Article ID: 1009-6094(2012)03-0137-05