

浑河冲洪积扇土壤硝酸盐污染特征及相关因素分析

左锐^{1,2}, 盖鹏^{1,2}, 滕彦国^{1,2}, 王金生^{1,2}, 孙岳³

(1. 北京师范大学水科学研究院, 北京 100875; 2. 地下水污染控制与修复教育部工程研究中心, 北京 100875;
3. 国家海洋局海洋咨询中心, 北京 100860)

摘要: 土壤硝酸盐是地下水硝酸盐的重要来源, 因此土壤硝酸盐特征研究对于土壤和地下水污染控制与修复具有重要意义。为了探讨沈阳浑河冲洪积扇硝酸盐污染特征, 在浑河洪积扇横跨浑河设计了5个监测断面、50个取样点, 每个取样点按0.8 m进行了垂向深度取样和硝酸盐测定。随后, 利用Hazen概率曲线确定了浑河冲洪积扇土壤硝酸盐含量的标准值, 采用单因子指数法和内梅罗污染指数评价法, 对不同断面和不同深度土壤硝酸盐的污染特征进行了分析, 并将区域污染特征与区域土地利用类型、区域有机质含量进行关联分析, 判定其对硝酸盐污染的影响。研究结果显示, 本区硝酸盐浓度标准值约为2.58 mg/kg; 区域硝酸盐中度污染; 排污河的存在、区域土地利用类型和区域有机质含量对区域硝酸盐污染关系密切, 在分析硝酸盐污染过程中应予以重点考虑。

关键词: 浑河冲洪积扇; 土壤; 硝酸盐; 污染特征; 土地利用类型; 有机质

中图分类号: X522 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-1683(2013)04-0046-05

Characteristics and Factors of Nitrate Pollution in Soil in the Alluvial-pluvial Fan of Hun River

ZUO Rui^{1,2}, GAI Peng^{1,2}, TENG Yanguo^{1,2}, WANG Jingsheng^{1,2}, SUN Yue³

(1. College of Water Sciences, Beijing Normal University, Beijing 100875, China; 2. Engineering Research Center of Groundwater Pollution Control and Remediation, Ministry of Education, Beijing 100875, China;
3. National Oceanic Consultation Center, State Oceanic Administration, Beijing 100860, China)

Abstract: Soil nitrate is one of the critical sources of groundwater nitrate; therefore the study of the characteristics of soil nitrate is important for the control and remediation of soil and groundwater pollution. In order to investigate the pollution characteristics of soil nitrate in the alluvial-pluvial fan of Hun River, five monitoring sections and 50 sampling locations were designed in the alluvial-pluvial fan across the Hun River, and the soil samples were collected and conducted nitrate measurement in a vertical interval of every 0.8 m at each sampling location. The Hazen probability curve was used to determine the standard values of soil nitrate in the alluvial-pluvial fan of Hun River, and the single factor index method and Nemer pollution index evaluation method were used to analyze the pollution characteristics of soil nitrate at different depths and sections. The pollution characteristics were analyzed in association with the regional land use type and regional organic matter content to determine their impacts on nitrate pollution. The results showed that the standard nitrate concentration is 2.58 mg/kg and nitrate has medium level pollution in this area, and the existence of sewage river, regional land use type, and regional organic matter content can have significant impacts on nitrate pollution.

Key words: alluvial-pluvial fan of Hun River; soil; nitrate; pollution characteristics; land use type; organic matter

氮在土壤及地下水系统循环中, 经过一系列的氨化作用、硝化作用及其反硝化作用等迁移转化过程, 主要以硝酸盐的形式污染地下水^[1]。其中最主要的过程是硝化作用: 土壤中的有机氮转化为 NH_4^+ 进入包气带, 经黏土矿物的固化和土壤颗粒的吸附等作用后, 其余部分在微生物的作用下发

生硝化作用转化为 NO_2^- 、 NO_3^- , 而 NO_2^- 不稳定, 也被氧化成 NO_3^- 进入地下水中^[2]; 反硝化作用主要是指氮以气体的方式返回大气中, 它对消除地下水中的硝酸盐污染有重要作用^[3]。进入土壤中的氮经过土壤微生物的矿化和硝化作用转变为硝态氮, 增加了土壤硝态氮负荷, 影响了土壤氮循环

收稿日期: 2012-11-21 修回日期: 2013-07-15 网络出版时间: 2013-07-28
网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20130728.1310.011.html>
基金项目: 环保公益性行业科研基金重大项目(201009009)
作者简介: 左锐(1981-), 男, 安徽人, 讲师, 博士, 主要从事地下水污染控制与修复领域研究。E-mail: zr@bnu.edu.cn

的过程。没有被植物吸收或脱氮的硝态氮运移至深层土壤,进而淋洗到地下水中,引起地下水水质污染^[4]。

近几十年来,随着工农业生产的发展,世界许多地方地表水和地下水中硝酸盐氮的含量在不断升高,农村、城市的土壤和地下水都存在着不同程度的硝酸盐污染,已经危及包气带土壤和地下水的质量安全。国内外关于土壤和地下水硝酸盐污染来源的研究较为丰富^[5-9],相继研究并报道了引起硝酸盐污染的因素有施用化肥和有机肥、生活污水、垃圾与粪便的下渗水、畜舍排水、污水灌溉、污染土地、工业污染源和大气氮化合物的沉降等^[7-9]。地下水硝酸盐的重要来源是土壤硝酸盐,因此研究土壤硝酸盐对于土壤和地下水污染控制与修复具有重要意义。

本文以沈阳浑河冲洪积扇土壤中硝酸盐为研究对象,开展典型区域的硝酸盐分布特征调查与分析,旨在明晰区域污染现状及污染特征。本研究对分析土壤和地下水中硝酸盐污染过程,进行土壤和地下水污染修复具有重要的科学意义。

1 研究区概况

沈阳浑河冲洪积平原地处辽宁省中部,行政区域包括沈阳市市属各区及辽中县、新民市的一部分和灯塔市的北部,地理坐标为北纬 41°30′ - 42°00′,东经 123°00′ - 123°40′,面积 3 069.41 km²,见图 1。历史数据显示,该地区地下水硝酸盐含量普遍高出国家饮用水标准上限值,对当地饮用水安全造成了极大的威胁。

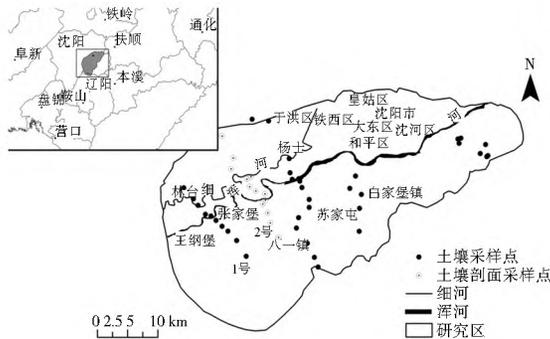


图 1 浑河冲洪积扇土壤采样点分布

Fig. 1 Distribution of soil sampling locations in the alluvial pluvial fan of Hun River

2 样品采集和分析

2011年10月对研究区土壤样品进行采集。选取5个横跨浑河南北的土壤断面,均匀分布51组土壤采样点,见图1。其中1号、2号断面对每组采样点不同深度(采样深度范围是0.2~5 m,每0.8 m采1个样)的土壤样品进行采集,其他断面只采取表层土壤(0.2~1.5 m)。每组土壤样品1 kg,装入透气的布质采样袋中,将采取的新鲜土壤样品进行筛选、检测、分析。硝酸盐含量采用紫外分光光度测定,试验过程中筛选出可用的50个表层样品检测结果显示硝酸盐(以N计)含量区间为:1.41~63.53 mg/kg。

3 结果与讨论

3.1 区域土壤硝酸盐标准值分析

由于我国《土壤环境质量标准》(GB 15618-1995)中没有

硝酸盐含量的标准值,这给区域硝酸盐污染评价造成了固有的困难。本次研究,基于区域土壤硝酸盐的实测数据,利用空间统计学方法——Hazen 概率曲线法,初步探讨适宜于浑河冲洪积扇地区的区域土壤硝酸盐含量的标准值,为后续的评价和健康风险评估提供技术参考。

应用 Hazen 概率曲线区分不同成因数据集是地球化学数据处理中的经典方法之一^[10],该方法要求数据集满足2个前提条件:(1)数据集所包含的子集数据满足对数正态分布规律;(2)数据集须由一定数目的数据构成,数据愈多,区分效果愈好。

已有研究表明,自然过程成因的元素含量分布符合对数正态分布规律^[10]。浑河冲洪积扇土壤中硝酸盐的主要来源是人为因素排放(污染叠加),而排放的硝酸盐主要是在自然营力如气流、重力、降水等作用下自然加入土壤,只要样品有足够的代表性,可以认为符合对数正态分布规律。另外,为便于对研究区土壤硝酸盐含量的标准值的探讨,在应用 Hazen 概率曲线方法时,将研究区土壤硝酸盐标准值的量假设成完全由自然过程产生,则可以将研究区土壤中硝酸盐的标准值的量和污染叠加含量分别看作2种成因的数据集。则由一定数量、在区域上分布均匀的样品构成的研究区土壤中硝酸盐含量数据集是满足 Hazen 概率曲线方法要求的,依据存在于含量数据间的内在联系,应用 Hazen 概率曲线法对2种含量进行区分。

研究区50个土壤样品硝酸盐含量(以N计)区间为:1.41~63.53 mg/kg,数据处理方法如下。

(1)将硝酸盐含量的数据按照含量值段(依据样本多少和样本间的含量差距确定,同时要保证数据集有足够的分组数,将每组样品数控制3个左右)进行数据分组,并统计每组中的样品数,计算其在样品总数中的频率及累积频率。

(2)根据步骤1所得的累积频率绘制 Hazen 概率曲线,并找出与曲线拐点对应的数据^[11](含量值)。

Hazen 概率曲线的做法为:Hazen 概率曲线的纵坐标为均匀分格的常规数学坐标,横坐标与频率值的标准正态分布分位数有关。由于标准正态分布分位数在概率 $P=50\%$ 处为零,而 Hazen 概率曲线在概率 $P=0.01\%$ 时的横坐标值为零,因此横坐标值的计算公式表示为:

$$L_P = u_P - u_{0.01\%} \quad (1)$$

式中: L_P 为 Hazen 概率曲线中频率 P 对应的横坐标值; u_P 为频率 P 对应的标准正态分布分位数; $u_{0.01\%}$ 为频率 $P=0.01\%$ 对应的标准正态分布分位数,其值为-3.719,其中标准正态分布分位数 u_P 、 $u_{0.01\%}$ 可由 Excel 软件中的统计函数 NORMSINV(P) 求取^[12]。

(3)以步骤2求得的拐点对应的数据为含量界限,将原先的数据集分为2个子集,再分别按步骤(1)的方法处理,计算得到每个子集中每项数据在新数据组中的频率和累积频率。

(4)根据步骤3求得的累积频率在图上点出曲线,此曲线即为子集数据的累积概率曲线。

(5)根据 Hazen 概率曲线规则进行数据检验并求得有关参数。

设子集1的频率为 f_1 ,子集2的频率为 f_2 , f_1 对应的含量为 P_1 , f_2 对应的含量为 P_2 。则当 P_1 等于 P_2 时,对应的

f_1, f_2 的累积样品数各自在总数据集中的累积频率之和与 P_1 或 P_2 ($P_1 = P_2$) 的交点应落在总数据集概率曲线上。 f_1, f_2 等于 50% 处的对应含量值(子集 Hazen 概率曲线横坐标值)即为子集 1、子集 2 的均值。 f_1, f_2 等于 84.1% 处的对应含量值(子集 Hazen 概率曲线横坐标值)与各自均值的差值即为各子集的标准差。据所得均值与标准差即可求得各子集的变异系数^[10], 通过比较两子集的均值与变异系数即可得到可用的研究区土壤硝酸盐标准值。

通过数据处理结果与所得曲线可以得到:子集 1 的均值为 2.58 mg/kg, 变异系数为 0.16; 子集 2 的均值为 4.43 mg/kg, 变异系数为 0.81。子集 1 相对于子集 2 的均值、变异系数均较小, 代表含量较低且分布较均匀的数据集特征; 子集 2 的均值相对较大、分布均匀性相对较差, 代表含量较高和分布不均匀的数据集特征。结合之前的假设, 可以认为子集 1 反映的是完全由自然过程形成的物质含量较均匀的内在特征, 代表了该地区土壤中硝酸盐的标准值的量的分布特征; 而子集 2 反映的是生产生活中人为因素的成因特征, 代表了人为污染叠加形成的研究区土壤硝酸盐含量分布特征。

故研究将以 2.58 mg/kg 作为浑河冲洪积扇土壤硝酸盐含量的标准值(以 N 计)。

3.2 土壤硝酸盐污染评价

3.2.1 平面分布特征

用筛选出有效的 50 个表层土壤样品的检测结果分析研究区平面空间上的土壤硝酸盐分布情况。硝酸盐浓度分布结果见图 2。从图 2 分布结果可以看出, 研究区土壤硝酸盐含量较高的区域主要位于中部白塔堡地区与西部的细河沿岸; 土壤硝酸盐含量较低的区域则集中在西南部、东部以及北部; 总体上, 浑河以北的区域土壤中硝酸盐含量较浑河以南高。

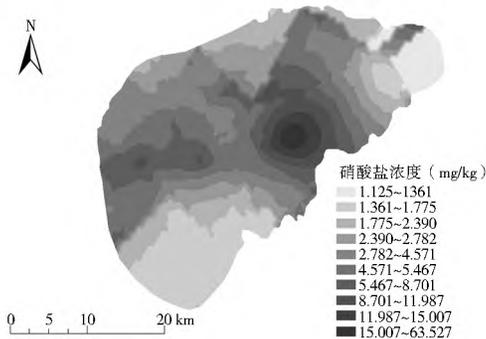


图 2 浑河冲洪积扇土壤硝酸盐(以 N 计)含量平面空间分布
Fig. 2 Spatial distribution of soil nitrate content in the alluvial-pluvial fan of Hun River

3.2.2 剖面分布特征

选取研究区 1 号、2 号断面为研究对象, 分析硝酸盐在包气带纵向剖面上的分布规律, 根据用筛选出的不同深度土壤样品的检测结果分析了研究区剖面上的硝酸盐分布情况。分析结果见图 3。

从分析结果来看, 土壤硝酸盐含量在单个取样点上, 随着垂向上埋深的增加逐渐降低, 这与土壤对硝酸盐的吸附因素存在一定的关系。在空间剖面上, 1 号断面, 越靠近浑河,

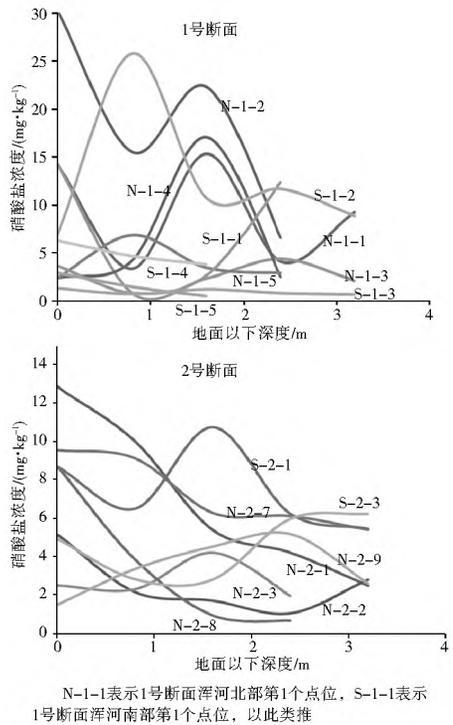


图 3 1 号、2 号断面各点位土壤硝酸盐垂向浓度变化
Fig. 3 Vertical variations of soil nitrate concentration at different locations in the first and second sections

硝酸盐含量有增加的趋势, 而且在 1 号断面上, 由于细河这一沈阳市主要排污河的存在, 硝酸盐浓度上升幅度较大, 2 号断面大致规律与 1 号断面相同, 但整体趋势较平缓。

3.2.3 区域土壤硝酸盐污染评价

区域土壤硝酸盐污染评价可以整体描述区域污染特征。本文选择单因子指数法^[13]和内梅罗污染指数评价法^[14]对研究区土壤硝酸盐污染进行评价, 评价模型为:

$$P_N = \frac{\sqrt{PI_{均}^2 + PI_{最大}^2}}{2} \quad (2)$$

式中: P_N 为内梅罗指数; $PI_{均}$ 为平均单因子污染指数; $PI_{最大}$ 为最大单因子污染指数。其中 $PI = C_i / C_0$, 这里 C_i 表示土壤硝酸盐含量实测值; C_0 表示土壤中硝酸盐含量的标准值。所求的结果根据表 1 进行评价。

表 1 内梅罗污染指数土壤污染评价标准

Table 1 Soil pollution evaluation standard of the Nemerow pollution index

等级	内梅罗污染指数	污染等级
\bar{N}	$P_N \leq 0.7$	清洁(安全)
\circ	$0.7 < P_N \leq 1.0$	尚清洁(警戒限)
\circ	$1.0 < P_N \leq 2.0$	轻度污染
\circ	$2.0 < P_N \leq 3.0$	中度污染
\circ	$P_N > 3.0$	重污染

根据本次监测结果分析, 本区土壤硝酸盐内梅罗指数 (P_N) 为 4.8, 结果表明研究区属于重污染区。

根据单因子指数法, 参照 Hakanson^[15] 提出的表征土壤污染程度的分类方法及土壤样品硝酸盐单因子指数得到结果见表 2。从表中可以看到处于轻度污染与中度污染区域的样品占了 81.7%, 而重度污染样品数只占到 4.8%。

由于内梅罗污染指数法对最大单因子污染指数的放大作用,使得内梅罗污染指数法得到的总体污染水平达到重度污染。

表 2 土壤硝酸盐单因子指数法评价结果

Table 2 Evaluation results of soil nitrate using the single factor index method

污染程度	污染指数	占总样品百分比(%)
轻度污染	$PI < 1$	43.5
中度污染	$1 < PI < 3$	38.2
高度污染	$3 < PI < 6$	13.5
重度污染	$PI > 6$	4.8

通过比较两种方法的评价结果并利用统计学原理,可以客观评价研究区土壤硝酸盐污染主要处于轻度与中度污染水平。

3.3 硝酸盐污染相关因素分析

3.3.1 区域硝酸盐污染与土地利用类型关系

土壤硝酸盐污染与区域土地利用类型之间存在着一定的内在关系。从研究区域土壤硝酸盐含量分布(图 2)与区域土地利用类型(图 4)进行关联分析,可以看出研究区土壤硝酸盐含量较高的中部白塔堡地区周围分布着大面积的旱田,农业生产中会使用大量化肥与农药,呈面源污染特点,调查显示该区域每年施肥量仅复合肥与氮肥就达到将近 5×10^5 t;另外白塔堡处沈抚灌渠接纳了抚顺市的工业污水和城市生活污水,水质相当恶劣,对该区域造成严重的污染。土壤硝酸盐含量较低的西南部、东部以及北部主要是水田与城区,城区由于建设需要,地面需要硬化、防渗,这在一定程度上阻止了硝酸盐的入渗,另外市区也不存在农业活动等高强度的污染源;而水田氮肥随水流失多、持氮能力不高,土壤长期饱水而处于还原环境,不利于硝酸盐存在,所以水田区硝酸盐污染较轻。

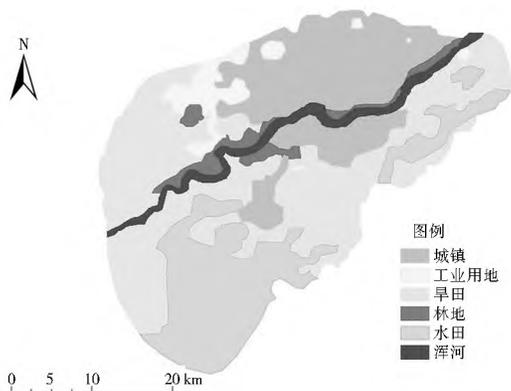


图 4 浑河冲洪积扇土地利用分区

Fig. 4 Land use zonations of the alluvial-pluvial fan of Hun River

此外,细河作为沈阳市主要的排污河流,长期接纳大量的工业污水和生活废水,水质污染严重,污染的河水经侧渗及早期的污水灌溉等方式进入土壤以及含水层,从而导致沿岸土壤、浅层地下水受到严重污染。浑河以北的区域土壤中硝酸盐含量较浑河以南要高,这与水田主要集中在南部有很大关系;再者浑河以北土质以砂土、亚砂土为主,土壤通透性较好有利于氮肥硝化作用形成硝酸盐,而南部地区以壤土、黏土居多,不利于硝酸盐的形成。

3.3.2 硝酸盐与有机质含量之间关系

土壤有机质含量分布也是区域土壤硝酸盐污染的重要影响因素之一。将浑河冲洪积扇土壤硝酸盐含量分布图与土壤有机质含量分布(图 5)进行关联分析,可以看出土壤硝酸盐的含量较高的一些区域(比如西部、中部),土壤中有有机质含量也较高。

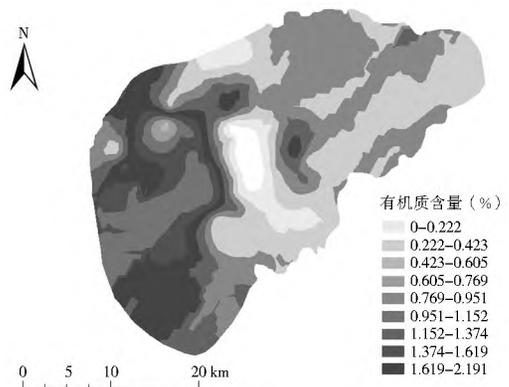


图 5 浑河冲洪积扇土壤有机质含量分布

Fig. 5 Distribution of soil organic matter content in the alluvial-pluvial fan of Hun River

这是由于土壤中的有机质包括有机氮、有机碳、有机磷等,当氮化细菌分解 C/N 比大的有机物料时,由于有机碳过剩,氮素不足,会导致微生物从土壤无机氮中吸取氮合成其自身体质;分解 C/N 比小的有机物料时,有机碳不足,而氮素却供给有余,此时氮的矿化作用大于固持作用,导致土壤无机氮的积累和增加。这就解释了为什么土壤中硝酸盐含量与有机质分布在部分地区有一致性,而有的地区存在差异,这与有机质中有机碳与有机氮的比值大小有关。

纵向上土壤中硝酸盐含量随着垂向上埋深的增加逐渐降低,这表明了硝酸盐垂向运移过程中发生了消耗,可能存在反硝化作用,这可以通过垂向上硝酸盐与有机质的变化趋势得到证实,见图 6。随着土壤硝酸盐含量的降低,土壤有机质也在减少,这是由于硝酸盐的反硝化作用消耗了有机质中有机碳,反应方程式如式(3)。



4 结论

本文初步分析了沈阳冲洪积扇区域土壤硝酸盐污染分布特征,并可能对污染产生影响的部分因素进行了分析,研究结果如下。

(1) 通过区域土壤硝酸盐污染监测数据分析,采用 Hazen 概率曲线确定浑河冲洪积扇土壤硝酸盐含量的标准值为 2.58 mg/kg 。

(2) 选择单因子指数法和内梅罗污染指数评价法对研究区土壤硝酸盐污染进行评价,评价结果显示浑河冲洪积扇土壤硝酸盐污染问题普遍存在,应针对性地采取防控措施。

(3) 浑河冲洪积扇土壤硝酸盐空间污染分布特征与排污河位置、土地利用类型及土壤有机质的含量关系密切,对其防控措施,需要重点考虑上述相关因素。

土壤硝酸盐是地下水中硝酸盐的重要来源,其分布与地

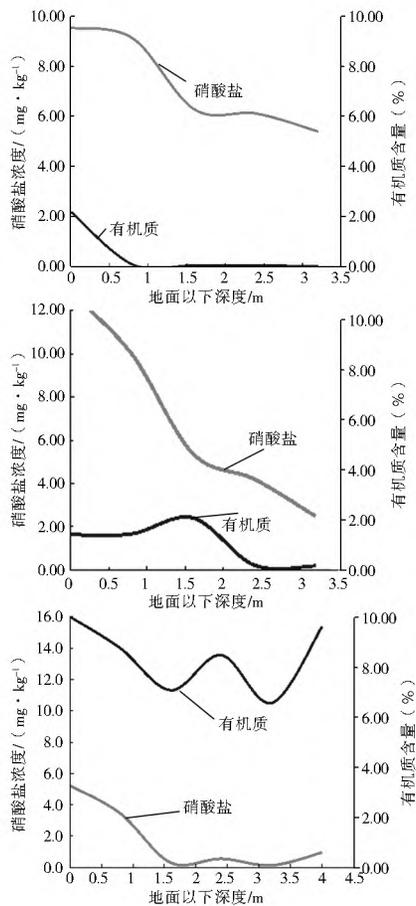


图 6 部分点位土样硝酸盐与土壤有机质含量垂向变化

Fig. 6 Vertical variations of soil nitrate concentration and soil organic matter content at several sampling locations

下水硝酸盐分布之间关系密切,因此需要给予更多的关注与重视。硝酸盐的迁移转化过程,特别是反硝化作用,对污染程度有举足轻重的作用,在后续污染分析和污染过程研究中应重点考虑硝酸盐的迁移转化等过程的影响。

参考文献 (References):

[1] 罗泽娇,靳孟贵.地下水三氮污染的研究进展[J].水文地质工程地质,2004,(4):65-69. (LUO Ze jiao, JIN Meng gui. Research Progress of Ammonia, Nitrite and Nitrate Pollution in Groundwater [J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 2004, (4): 65-69. (in Chinese))

[2] 陈建耀,王亚,张洪波,等.地下水硝酸盐污染研究综述[J].地理科学进展,2006,25(1):34-44. (CHEN Jian yao, WANG Ya, ZHANG Hong bo, et al. Overview on the Studies of Nitrate Pollution in Groundwater [J]. Progress in Geography, 2006, 25 (1): 34-44. (in Chinese))

[3] 张洪,王五一,李海荣,等.地下水硝酸盐污染的研究进展[J].水资源保护,2008,24(6):7-11. (ZHANG Hong, WANG Wu yi, LI Hai rong, et al. Review of Research on Nitrate Pollution in Groundwater [J]. Water Resources Protection, 2008, 24(6): 7-11. (in Chinese))

[4] 赵解春,李玉中,徐春英,等.地下水硝酸盐污染来源的推断与溯源方法概述[J].中国农业通报,2010,26(18):374-378. (ZHAO Xie chun, LI Yu zhong, XU Chun ying, et al. Summary on Deduction and Trace the Source Methods for Ground Water Nitrate Contamination [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2010, 26(18): 374-378. (in Chinese))

tin, 2010, 26(18): 374-378. (in Chinese))

[5] 刘咏,严小三,张婷.土壤硝酸盐污染的生物修复试验研究[J].合肥工业大学学报(自然科学版),2010,33(11):1686-1689. (LIU Yong, YAN Xiao san, ZHANG Ting. Experimental Study of Bioremediation of Nitrate contaminated Soil [J]. Journal of Hefei University of Technology, 2010, 33(11): 1686-1689. (in Chinese))

[6] Insaf S, Mohamed A, Mohamed 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.

[7] 刘宏斌,张云贵,李志宏,等.北京市平原农区深层地下水硝态氮污染状况研究[J].土壤学报,2005,42(3):411-418. (LIU Hong bin, ZHANG Yun gui, LI Zhi hong, et al. Nitrate Contamination of Deep Groundwater in Rural Plain Areas of Beijing [J]. Acta Pedologica Sinica, 2005, 42(3): 411-418. (in Chinese))

[8] Fernadot, Wakidaa L. Non agricultural Sources of Groundwater Nitrate: a Review and Case Study [J]. Water Research, 2005, 39: 3-16.

[9] 刘光栋,吴文良.华北农业高产粮区地下水污染源特征及环境影响研究[J].中国生态农业学报,2005,13(2):125-129. (LIU Guang dong, WU Wen liang. Characteristics and Environmental Impact of Non point Pollution of Groundwater Under the High yield Farmlands of North China [J]. Chinese Journal of Eco Agriculture, 2005, 13(2): 125-129. (in Chinese))

[10] Sinclair A J. Application of Probability Graphs in Mineral Exploration [M]. Canada: Richmond Printers Ltd, 1976.

[11] 张辉.土壤重金属污染中背景含量与污染叠加含量的区分[J].环境化学,2003,22(6):605-610. (ZHANG Hui. A Way of Probe for Identifying Geological Setting Content among Heavy Metal Concentrations in the Soil [J]. Environmental Chemistry, 2003, 22(6): 605-610. (in Chinese))

[12] 林莺,李世才.水文频率曲线简捷计算和绘图技巧[J].水利水电技术,2002,33(1):52-53. (LIN Ying, LI Shi cai. Skill in Computing and Drawing Easily and Rapidly Hydrologic Frequency Curve [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2002, 33(1): 52-53. (in Chinese))

[13] 张航,柴勇,叶志文.单因子指数法分析重庆清水溪非点源污染[J].科技传播,2011,(10):230-231. (ZHANG Hang, CAI Yong, YE Zhi wen. Non point Source Pollution Analysis of Chongqing Qingshuixi with Single Factor Index Method [J]. Science and Technology Communication, 2011(10): 230-231. (in Chinese))

[14] 段飞舟,何江,高吉喜,等.污灌区农田土壤环境质量评价[J].环境科学研究,2006,(3):114-116. (DUAN Fei zhou, HE Jiang, GAO Ji xi, et al. Farmland Soil Quality Evaluation in Sewage Irrigation Area [J]. Research of Environmental Sciences, 2006, (3): 114-116. (in Chinese))

[15] Hakanson L. An Ecological Risk Index for Aquatic Pollution Control: A Sedimentological Approach [J]. Water Research, 1980, 14 (8).

[16] Stephen R, Hinkle A, Leon J. Combining Particle tracking and Geochemical Data to Assess Public Supply Well Vulnerability to Arsenic and Uranium [J]. Journal of Hydrology, 2009, 376 (1-2): 132-142.

[17] Laura D, Domenico L, Manuela L. Correlation Between Nitrate Concentration in Groundwater and Parameters Affecting Aquifer Intrinsic Vulnerability [J]. Environment Geology, 2008, 55(3): 539-558.