

北京城市生态系统地表水硝酸盐污染空间变化及其来源研究

徐志伟^{1,2,3}, 张心昱^{2*}, 任玉芬^{1*}, 孙晓敏², 王效科¹, 王升忠³

(1. 中国科学院生态环境研究中心城市与区域生态国家重点实验室, 北京 100085; 2. 中国科学院地理科学与资源研究所生态系统网络观测与模拟重点实验室, 北京 100101; 3. 东北师范大学城市与环境科学学院, 长春 130024)

摘要: 利用2009~2010年北京城市生态系统地表水10处监测点水环境监测数据, 评价了北京城市生态系统地表水硝酸盐污染状况及其空间分布, 结合水化学因子相关关系分析了硝酸盐的主要来源。结果表明, 北京城市生态系统地表水硝态氮(NO_3^- -N)质量浓度为 $0.7\sim 7.6\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 其中, 位于北京市东南部的地表水监测点(东便门和通惠河)水体 NO_3^- -N质量浓度为 $7.0\sim 7.6\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 显著高于上游8个监测点 NO_3^- -N质量浓度($P < 0.01$); Cl^- 质量浓度为 $14.8\sim 86.0\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 东便门、通惠河地表水监测点水体 Cl^- 质量浓度为 $81.5\sim 85.0\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 约为上游其他8个监测点的2.3~5.8倍。东便门、通惠河地表水监测点水体电导率(EC)、 SO_4^{2-} 质量浓度也表现出同 NO_3^- -N、 Cl^- 相似的变化规律, 表明东便门、通惠河两处地表水监测点附近存在明显的污染源。相关分析表明, 地表水 Cl^-/Na^+ 和 $\text{SO}_4^{2-}/\text{Ca}^{2+}$ 呈明显的线性相关, 说明地表水 NO_3^- -N污染来源比较单一; 水体中 NO_3^- -N/ Cl^- 及 NO_3^- -N的质量浓度状况说明北京城市生态系统地表水 NO_3^- -N污染来源主要是城市污水, 包括污水处理厂的废水、垃圾沥出液及生活污水。未来北京市地表水治理应重点关注东便门、通惠河等东南部下游水体污染治理。

关键词: 城市生态系统; 地表水; 硝酸盐; 水化学因子; 污水

中图分类号: X523 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2012)08-2569-05

Spatial Changes and Sources of Nitrate in Beijing Urban Ecosystem Surface Water

XU Zhi-wei^{1,2,3}, ZHANG Xin-yu², REN Yu-fen¹, SUN Xiao-min², WANG Xiao-ke¹, WANG Sheng-zhong³

(1. State Key Laboratory of Urban and Regional Ecology, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China; 2. Key Laboratory of Ecosystem Network Observation and Modeling, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China; 3. College of Urban and Environmental Science, Northeast Normal University, Changchun 130024, China)

Abstract: The spatial variation in nitrate-nitrogen (NO_3^- -N) concentrations in surface water of ten sampling sites in the Beijing urban ecosystem from Kunminghu Lake to Tonghui River were assessed using monitoring data from 2009 to 2010. Nitrogen sources were examined using a hydro-chemical method. The results showed that the average nitrate-N concentrations of surface water in the Beijing urban ecosystem ranged from $0.7\sim 7.6\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, with concentrations at all sites affected by human activities to a varying degree. The nitrate-N concentrations in the Dongbianmen and Tonghui River located in the southeastern of Beijing ranged from $7.0\sim 7.6\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ and were significantly higher than those in the upper reaches ($P < 0.01$). For all sampling sites, the chloride concentrations fell between $14.8\sim 86.0\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$. The chloride concentrations at the furthest downstream sites, in the Dongbianmen and Tonghui River, ranged from $81.5\sim 85.0\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ and were 2.3~5.8 times higher than those in the upper reaches. This indicates that the surface water in Dongbianmen and Tonghui River is clearly affected by human activities and that there are outfalls or pollutant sources near these two sampling sites. Further, the Cl^-/Na^+ , $\text{SO}_4^{2-}/\text{Ca}^{2+}$ ratios showed that the majority of nitrate-N came from a single source. The information given by the nitrate-N concentrations combined with the NO_3^- -N/ Cl^- ratio implied that sewage effluent, including industrial waste water, leakage from solid waste disposal and domestic wastewater mainly controlled nitrate distribution in the Beijing urban surface water. The results from this study suggest that surface water management should focus on downstream sites located in the southeastern region of Beijing such as the Dongbianmen and Tonghui River in the future.

Key words: urban ecosystem; surface water; nitrate; hydro-chemical indicators; sewage

硝酸盐(NO_3^-)是地表水常见的污染物之一, 水体过量的 NO_3^- -N不但会引起水体富营养化、厌氧及生物多样性丧失^[1], 而且饮用水 NO_3^- 含量高还会引起婴儿及牲畜的健康问题^[2]。美国环保署(EPA)、中国对水体硝酸盐规定的标准均为

收稿日期: 2011-10-11; 修订日期: 2012-02-17
基金项目: 中国科学院知识创新工程重要方向项目(KZCX2-EW-310); 国家自然科学基金面上项目(41171153); 国家自然科学基金青年科学基金项目(40901265)
作者简介: 徐志伟(1985~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为湿地环境变化及环境地球化学, E-mail: xuzw389@163.com
* 通讯联系人, E-mail: zhangxy@igsrr.ac.cn, yfen@cees.ac.cn

$\leq 10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ^[3,4], 而世界卫生组织(WHO) 规定的水体硝酸盐标准为 $\leq 11.3 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. 有研究发现北京市超过 60% 的河流、湖泊和水库水体富营养化较为严重, 主要指标即为氮^[5]. 目前, 对城市水体 NO_3^- 来源的研究多数集中于地下水^[6-8], 而对于地表水更多的是利用水质评价模型对主要河湖整体水质进行评价^[9-11], 对地表水 NO_3^- 污染来源的研究较少. 确定城市生态系统水体 NO_3^- -N 主要污染来源是改善城市生态系统水环境质量的首要解决的问题, 对城市景观生态建设、工业发展及居民生活有重要意义.

快速的城市化进程、不够完善的排污设施加剧了污染物向城市河流廊道及湖泊的排放. 城市生态系统水体 NO_3^- -N 是各种点源、面源污染综合作用的结果, 这其中包括污水处理厂排污、垃圾填埋场的沥出液、工厂排污、排水管道渗漏、大气沉降、建筑垃圾及游乐场排污等^[12]. 因距居民区、工业排污点的远近及氮的形态转化等因素的差异会引起一定区域内水体硝酸盐污染的空间差异. 岳甫均等^[13]对天津市氮污染研究发现水体 NO_3^- 污染也存在明显差异; 肖智毅^[14]利用 STATA 4.0 统计软件结合单因素方差分析对 1990~2000 年北京市海淀区地下水 NO_3^- 污染状况及影响因素进行分析, 发现水体 NO_3^- 超标率为 8.5%, 且地下水 NO_3^- 污染有明显的空间差异.

水化学方法是判别水体 NO_3^- -N 污染来源的一种传统方法. 一种是利用不同污染源的排放数据及 NO_3^- 质量浓度来分析水体 NO_3^- 的污染来源, 通过对天津、苏州、广州、辽宁海城等地区地表水 NO_3^- 污染研究发现生活污水及工业废水为城市生态系统地表水 NO_3^- 主要污染来源^[15-19]; 另一种是利用水中其他离子进行研究, 因不同污染来源中离子成分存在差异, 如生活污水中氯离子 (Cl^-) 质量浓度较高, 而建筑垃圾及污水处理厂排放的废水中硫酸根离子 (SO_4^{2-}) 较高, 这种方法也同样被诸多学者应用于不同生态系统地表水、地下水氮循环及 NO_3^- -N 的污染来源的研究^[20-22].

本研究利用北京城市生态系统 10 个典型地表水监测点 2009~2010 年地表水水环境指标监测数据, 对北京城市生态系统典型地表水 NO_3^- -N 污染状况、空间差异进行分析, 并通过水化学分析方法研究其 NO_3^- -N 主要污染来源, 以期北京市地表水 NO_3^- -N 污染治理提供科学依据.

1 研究区域与方法

1.1 研究区概况

研究区昆明湖至通惠河段, 从北京市西北郊颐和园附近流向北京市东南, 最终经河北、天津流向渤海, 涉及到的河流主要有长河、转河、北护城河、菖蒲河及通惠河, 均属于通惠河水系, 总流域面积 250 km^2 , 各地表水采样点分布情况如图 1 所示. 昆明湖为一半自然、半人工的湖泊, 原为众多泉水汇聚成的天然湖泊. 长河最初经金代开挖, 元代加以扩建并完善, 成为北京城区水源的重要通道, 全长 5.5 km. 转河为北京北环水系中长河的一部分, 西起北京展览馆, 东到新街口北护城河, 全长 3.7 km. 北护城河起自西直门北三义河口, 向东流经德胜门、安定门至东北城角, 与东护城河相接, 宽 26 m, 全长 6.9 km. 菖蒲河位于天安门东, 河道全长 510 m, 水面宽 9 m, 水深 1.5~2 m, 河道两岸为 20 m 宽的绿地. 通惠河全长 22 km, 位于北京市东郊, 曾为著名的南北大运河的北段. 在本研究中, 采样点昆明湖位于昆明湖出口处, 长春桥、图书馆、动物园、转河均分布在长河, 前海、护城河分布在北护城河, 东便门、通惠河分布于通惠河.

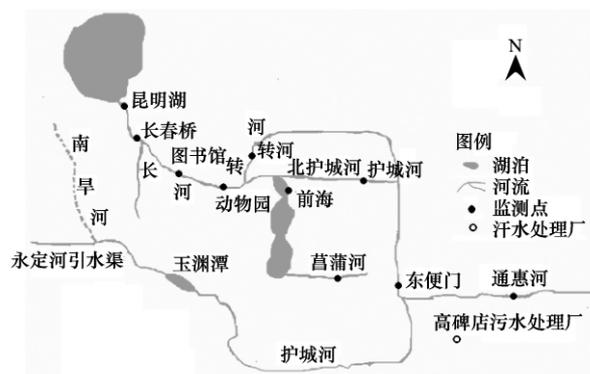


图 1 地表水采样点分布示意

Fig. 1 Location of the surface water sampling sites

1.2 监测、分析方法与数据处理

利用中国生态系统网络北京城市生态站 10 个典型地表水监测点 2009~2010 年 2 次/月监测数据, 对北京市地表水 NO_3^- -N 空间分布、来源进行了分析.

地表水昆明湖至通惠河段 10 个采样点的 pH、电导率、各种阴、阳离子监测数据, 结合水化学方法分析北京城市生态系统地表水 NO_3^- -N 污染来源. 其中 pH、电导率分别用 pH 计和电导率仪进行测定. NO_3^- 、 SO_4^{2-} 、 Cl^- 、 Na^+ 、 Ca^{2+} 的测定水样先用

0.45 μm 聚碳酸酯滤膜过滤后,用 ICS-1000 离子色谱分析(美国戴安公司).所有监测数据在 Excel 2003 中处理,用 SPSS 进行统计分析.

2 结果与讨论

2.1 硝酸盐及其他水化学指标空间变化

表 1 为北京城市生态系统地表水化学要素指标.各样点地表水 pH 平均大于 7.5,呈弱碱性,其中前海和菖蒲河 $\text{pH} > 8.0$.昆明湖至菖蒲河 EC 在 450 ~ 600 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ 之间,东便门及通惠河 $\text{EC} > 900 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$. Cl^- 质量浓度为 14.8 ~ 86.0 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$,从上游至下游呈逐渐升高趋势,不同监测点 Cl^- 质量浓度差异达到极显著水平 ($P < 0.01$),下游东便门、通惠河 Cl^- 质量浓度约为上游监测点的 2.3 ~ 5.8 倍.地表水 NO_3^- -N 质量浓度变化范围为 0.7 ~ 7.6

$\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$.流域上游昆明湖至菖蒲河地表水监测点 NO_3^- -N 质量浓度较低,其平均值变化范围为 0.7 ~ 3.4 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$.下游东便门和通惠河地表水 NO_3^- -N 质量浓度为 7.6 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 、7.0 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$,且显著高于上游监测点 ($P < 0.01$).根据 WHO 规定的饮用水 NO_3^- -N 的标准 10 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$,东便门和通惠河地表水 NO_3^- -N 质量浓度超标率分别为 36%、23%.研究认为水体 NO_3^- -N 地球化学背景值为 2.0 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ [23],北京市地表水均有不同程度的 NO_3^- -N 污染现象,以下游的东便门和通惠河尤为严重.

北京市地表水 10 个监测点中,东便门和通惠河监测点地表水 NO_3^- -N、 Cl^- 质量浓度均显著高于上游的 8 个监测点地表水,水体污染较为严重.地表水 NO_3^- -N、 Cl^- 质量浓度明显的空间差异说明在下游东便门和通惠河监测点附近存在污染源.

表 1 北京城市生态系统地表水水化学要素组成 (Mean \pm S. E.) ($n = 38$)¹⁾

Table 1 Hydro-chemical compositions of Beijing urban ecosystem surface water

采样点名称	pH	EC/ $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$	$\text{Cl}^-/\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	$\text{SO}_4^{2-}/\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	NO_3^- -N/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$
昆明湖	8.0 \pm 0.04 (c)	469 \pm 18 (a)	14.8 \pm 1.09 (a)	71.3 \pm 6.18 (a)	1.8 \pm 0.13 (a)
长春桥	7.7 \pm 0.04 (a)	548 \pm 20 (a)	20.7 \pm 1.27 (b)	78.3 \pm 4.19 (b)	3.0 \pm 0.22 (b)
图书馆	7.6 \pm 0.03 (a)	588 \pm 19 (b)	24.4 \pm 1.47 (b)	82.3 \pm 5.09 (b)	3.4 \pm 0.25 (b)
动物园	7.6 \pm 0.03 (a)	593 \pm 21 (b)	25.5 \pm 1.56 (b)	81.6 \pm 3.75 (b)	3.3 \pm 0.29 (b)
转河	7.7 \pm 0.03 (a)	592 \pm 22 (b)	25.7 \pm 1.39 (b)	77.1 \pm 3.64 (a)	3.0 \pm 0.26 (b)
护城河	7.8 \pm 0.04 (b)	577 \pm 21 (b)	28.8 \pm 1.74 (b)	81.4 \pm 5.64 (b)	2.5 \pm 0.23 (b)
前海	8.1 \pm 0.07 (c)	541 \pm 16 (a)	28.1 \pm 1.31 (b)	84.5 \pm 5.54 (b)	2.0 \pm 0.20 (a)
菖蒲河	8.3 \pm 0.06 (c)	562 \pm 24 (a)	36.2 \pm 1.23 (c)	99.1 \pm 5.95 (c)	0.7 \pm 0.11 (a)
东便门	8.0 \pm 0.09 (c)	931 \pm 45 (c)	81.5 \pm 5.27 (d)	92.5 \pm 4.22 (c)	7.6 \pm 1.49 (c)
通惠河	7.8 \pm 0.10 (b)	943 \pm 45 (c)	86.0 \pm 5.54 (d)	99.2 \pm 4.88 (c)	7.0 \pm 0.88 (c)

1) 每列中不同的字母表示差异显著 ($P < 0.05$)

2.2 应用水化学指标示踪 NO_3^- -N 污染来源

地表水 NO_3^- -N 的可能污染来源有大气沉降、工厂废水、动物粪便、生活污水及土壤微生物氮等,而城市生态系统地表水污染来源主要是大气沉降、工厂废水、生活污水^[12]、园林、建筑用的肥料、垃圾渗滤液等.由于受各种物理、化学、生物过程的影响,使得单靠对地表水 NO_3^- -N 质量浓度及变化趋势的监测不能有效地分辨水体硝酸盐的污染来源.

图 2 为北京市地表水 Cl^-/Na^+ 和 $\text{SO}_4^{2-}/\text{Ca}^{2+}$ 变化关系图.从图 2(a) 中看出北京市地表水 Cl^-/Na^+ 比值接近 1:1,二者相关性达到极显著水平 ($r = 0.928$, $P < 0.01$).城市生态系统中地表水潜在的 Cl^- 污染源主要是污水及融雪剂,其中融雪剂中使用最为普遍的是 NaCl.从昆明湖到下游东便门地表水 Cl^-/Na^+ 比值有显著的上升趋势 ($P < 0.01$),昆

明湖 Cl^-/Na^+ 比值为 1.08 \pm 0.06,而在下游通惠河和东便门 Cl^-/Na^+ 比值升高到 1.42 \pm 0.06,说明下游地表水 NO_3^- -N 可能主要受污水影响,使得 Cl^-/Na^+ 比值高于上游地表水.图 2(b) 为北京市地表水 $\text{SO}_4^{2-}/\text{Ca}^{2+}$ 变化关系,可以看出北京市地表水 10 个监测点 $\text{SO}_4^{2-}/\text{Ca}^{2+}$ 比值在 1:1 ~ 2:1 之间,变化趋势相似 ($r = 0.490$, $P < 0.01$),且东便门监测点地表水 SO_4^{2-} 质量浓度相对于其它 10 个监测点地表水更高.城市生态系统地表水 SO_4^{2-} 的主要污染来源为建筑及工业生产中使用的石膏以及污水处理过程中为防止藻类生长而使用的 CuSO_4 ^[24].地表水 Cl^-/Na^+ 和 $\text{SO}_4^{2-}/\text{Ca}^{2+}$ 变化趋势表明下游的东便门和通惠河地表水主要受城市生活污水影响.此外,从图 2 还可以看出,10 个监测点地表水 Cl^-/Na^+ 和 $\text{SO}_4^{2-}/\text{Ca}^{2+}$ 变化趋势均基本一致,说明影响这 10 个监测点

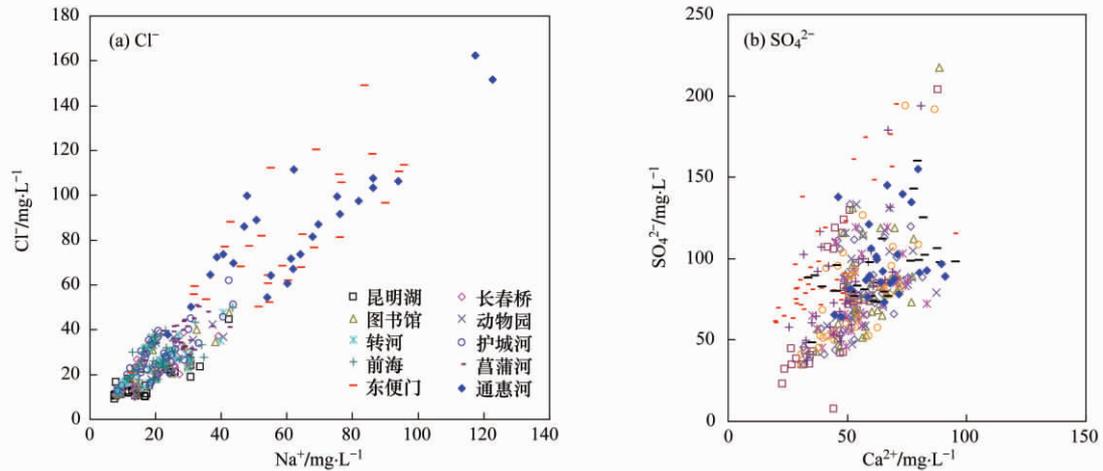


图 2 北京城市生态系统地表水 SO_4^{2-}/Ca^{2+} 和 Cl^-/Na^+ 变化关系

Fig. 2 Relationship between SO_4^{2-} and Ca^{2+} , Na^+ and Cl^- concentration of the surface water in Beijing urban ecosystem

地表水 $NO_3^- - N$ 的污染来源较为单一^[24]。

一般城市生活污水及工业废水中 Cl^- 质量浓度较高。 Cl^- 因不受水中各种物理、化学及微生物过程的影响,是污水的主要水化学指示因子。利用 $NO_3^- - N/Cl^-$ 方法能够为水体 $NO_3^- - N$ 污染来源提供更有效的信息^[25-26]。近几年有很多学者利用 $NO_3^- - N/Cl^-$ 开展有关水体 $NO_3^- - N$ 的污染来源研究^[27-29]。

图 3 为北京城市生态系统地表水 $NO_3^- - N/Cl^-$ 变化关系。可以看出,北京市地表水上游昆明湖至菖蒲河地表水 $NO_3^- - N/Cl^-$ 比值较低,分布较为集中;东便门及通惠河监测点地表水 $NO_3^- - N$ 、 Cl^- 质量浓度高于上游监测点,且 $NO_3^- - N$ 质量浓度随着 Cl^- 质量浓度的升高而迅速升高,二者之间存在显著相关性 ($P < 0.01$)。城市污水中 Cl^- 离子质量浓度较高,

说明北京城市生态系统地表水 $NO_3^- - N$ 的主要污染源可能是污水,这与 Wakida 等^[12]对城市生态系统水体 $NO_3^- - N$ 污染来源的研究结果一致,污水可能主要是废水处理厂排放、垃圾沥出液及生活污水等。经调查发现高碑店污水处理厂位于下游通惠河监测点南端,因通惠河本身没有补水系统,其蓄水主要靠高碑店污水处理厂。尽管污水经污水处理厂处理后才排入通惠河,但依旧会对河道水体产生影响。研究表明未经处理的工厂废水及生活污水对地表水 $NO_3^- - N$ 质量浓度有严重影响^[30],即使是根据二级污水处理技术所能达到的程度,最后排放的污水也会含有一定数量的污染物质(有机质、氮、磷等),同样会造成水体富营养化和水华现象。此外,也有学者提出路面尘埃对地表水 $NO_3^- - N$ 的贡献也不容忽视^[31]。

3 结论

(1) 2009 ~ 2010 年北京城市生态系统地表水 $NO_3^- - N$ 质量浓度为 $0.7 \sim 7.6 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,其中北京市西北部、市中心监测点水体污染不明显,东南部的地表水 $NO_3^- - N$ 质量浓度显著高于其他监测点 $NO_3^- - N$ 质量浓度 ($P < 0.01$), Cl^- 、 SO_4^{2-} 、EC 质量浓度也存在同样的变化规律,表明北京市地表水污染主要发生在市区的东南部。

(2) 地表水 Cl^-/Na^+ 和 SO_4^{2-}/Ca^{2+} 呈明显的线性相关,各监测点变化趋势相似,说明地表水 $NO_3^- - N$ 污染来源比较单一。水体中 $NO_3^- - N/Cl^-$ 及水体 $NO_3^- - N$ 的质量浓度状况说明北京城市生态系统地表水 $NO_3^- - N$ 污染来源主要是城市污水,以下游的东便门、通惠河污染最为严重。

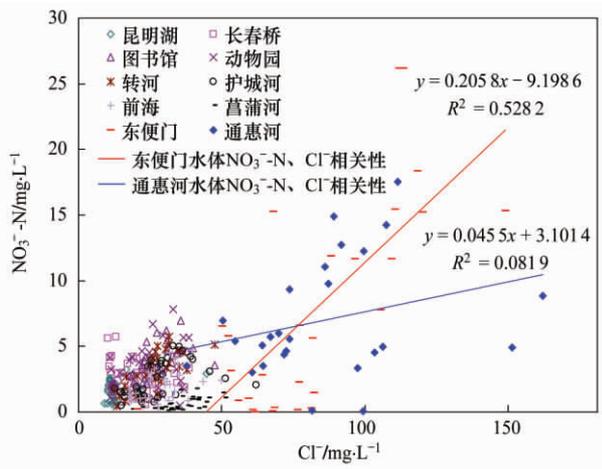


图 3 北京城市生态系统地表水 $NO_3^- - N/Cl^-$ 变化关系

Fig. 3 Relationship between $NO_3^- - N$ and Cl^- concentration of the surface water in Beijing urban ecosystem

致谢: 感谢中国生态系统研究网络北京城市生态站王华峰、王巧环等对样品的采集和分析工作。

参考文献:

- [1] Galloway J N , Aber J D , Erisman J W , *et al.* The nitrogen cascade [J]. *Bioscience* , 2003 , **53**(4) : 341-356.
- [2] Fennessy M S , Cronk J K. The effectiveness and restoration potential of riparian ecotones for the management of nonpoint source pollution , particularly nitrate [J]. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology* , 1997 , **27** (4) : 285-317.
- [3] Nolan B T , Hitt K J. Vulnerability of shallow groundwater and drinking-water wells to nitrate in the United States [J]. *Environmental Science and Technology* , 2006 , **40**(24) : 7834-7840.
- [4] GB 3838-2002. 中华人民共和国环境质量标准[S].
- [5] 荆红卫. 北京市地表水污染原因分析与防治对策[J]. *城市环境与城市生态* , 2006 , **19**(4) : 17-19.
- [6] 李春萍, 李国学, 罗一鸣, 等. 北京市 6 座垃圾填埋场地下水环境质量的模糊评价[J]. *环境科学* , 2008 , **29**(10) : 2729-2735.
- [7] 刘宏斌, 雷宝坤, 张云贵, 等. 北京市顺义区地下水硝态氮污染的现状与评价[J]. *植物营养与肥料学报* , 2001 , **7**(4) : 385-390.
- [8] 徐志伟, 张心昱, 孙晓敏, 等. 2004 ~ 2009 年我国典型陆地生态系统地下水硝态氮评价[J]. *环境科学* , 2011 , **32**(10) : 2827-2833.
- [9] 荆红卫, 华蕾, 孙成华, 等. 北京城市湖泊富营养化评价与分析[J]. *湖泊科学* , 2008 , **20**(3) : 357-363.
- [10] 李婷, 武晓峰. 基于 PPI 的河段水体潜在污染研究[J]. *环境科学* , 2010 , **31**(11) : 2619-2626.
- [11] 张微微, 孙丹峰, 李红, 等. 北京密云水库流域 1980 ~ 2003 年地表水质评价[J]. *环境科学* , 2010 , **31**(7) : 1483-1491.
- [12] Wakida F T , Lerner D N. Non-agricultural sources of groundwater nitrate: a review and case study [J]. *Water Research* , 2005 , **39**(1) : 3-16.
- [13] 岳甫均, 李军, 刘小龙, 等. 利用氮同位素技术探讨天津地表水氮污染[J]. *生态学杂志* , 2010 , **29**(7) : 1403-1408.
- [14] 肖智毅. 海淀区地下水硝酸盐污染及其影响因素[J]. *环境与健康杂志* , 2003 , **20**(3) : 158-160.
- [15] 秦保平, 房玉梅, 高翔, 等. 天津市地表水环境氮污染特征及来源解析[J]. *城市环境与城市生态* , 2009 , **22**(4) : 37-40.
- [16] 刑光熹, 施书莲, 杜雨娟, 等. 苏州地区水体氮污染状况[J]. *土壤学报* , 2001 , **38**(4) : 540-546.
- [17] 俞盈. 广州城市水体氮污染研究[D]. 广州: 中国科学院广州地球化学研究所, 2007.
- [18] 徐宁, 段舜山, 林秋奇, 等. 广东大中型供水水库的氮污染与富营养化分析[J]. *生态学杂志* , 2004 , **23**(3) : 63-67.
- [19] Bu H M , Meng W , Zhang Y. Nitrogen pollution and source identification in the Haicheng River basin in Northeast China [J]. *Science of the Total Environment* , 2011 , **409**(18) : 3394-3402.
- [20] Petitta M , Fracchiolla D , Aravena R , *et al.* Application of isotopic and geochemical tools for the evaluation of nitrogen cycling in an agricultural basin , the Fucino Plain , Central Italy [J]. *Journal of Hydrology* , 2009 , **372**(1-4) : 124-135.
- [21] Katz B , Copeland R , Greenhalgh T , *et al.* Using multiple chemical indicators to assess sources of nitrate and age of groundwater in a karstic spring basin [J]. *Environmental & Engineering Geoscience* , 2005 , **11**(4) : 333-346.
- [22] Andrade A I A S S , Stigter T Y. Multi-method assessment of nitrate and pesticide contamination in shallow alluvial groundwater as a function of hydrogeological setting and land use [J]. *Agricultural Water Management* , 2009 , **96**(12) : 1751-1765.
- [23] Muller D K , Helsel D R. Nutrients in the nations water-too much of a good thing? [R]. USGS National Water-Quality Assessment Program Circular , 1996. 1136.
- [24] Panno S V , Hackley K C , Hwang H H , *et al.* Determination of the sources of nitrate contamination in karst springs using isotopic and chemical indicators [J]. *Chemical Geology* , 2001 , **179**(1-4) : 113-128.
- [25] Widory D , Kloppmann W , Chery L , *et al.* Nitrate in groundwater: An isotopic multi-tracer approach [J]. *Journal of Contaminant Hydrology* , 2004 , **72**(1-4) : 165-188.
- [26] Widory D , Petelet-Giraud E , Négrel P , *et al.* Tracking the sources of nitrate in groundwater using coupled nitrogen and boron isotopes: A synthesis [J]. *Environmental Science & Technology* , 2005 , **39**(2) : 539-548.
- [27] Lee K S , Bong Y S , Lee D , *et al.* Tracing the sources of nitrate in the Han River watershed in Korea , using $\delta^{15}\text{N-NO}_3^-$ and $\delta^{18}\text{O-NO}_3^-$ values [J]. *Science of the Total Environment* , 2008 , **395**(2-3) : 117-124.
- [28] Li S L , Liu C Q , Li J , *et al.* Assessment of the sources of nitrate in the Changjiang River , China using a nitrogen and oxygen isotopic approach [J]. *Environmental Science & Technology* , 2010 , **44**(5) : 1573-1578.
- [29] Katza B G , Chelette A R , Pratt T R. Use of chemical and isotopic tracers to assess nitrate contamination and ground-water age , Woodville Karst Plain , USA [J]. *Journal of Hydrology* , 2004 , **289**(1-4) : 36-61.
- [30] Xie Y X , Xiong Z Q , Xing G X , *et al.* Assessment of nitrogen pollutant sources in surface waters of Taihu Lake region [J]. *Journal of Environmental Science* , 2007 , **17**(2) : 200-208.
- [31] Kojima K , Murakami M , Yoshimizu C , *et al.* Evaluation of surface runoff and road dust as sources of nitrogen using nitrate isotopic composition [J]. *Chemosphere* , 2011 , **84**(11) : 1716-1722.