

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第36卷 第9期

Vol.36 No.9

2015

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

长江三角洲 PM_{2.5} 质量浓度遥感估算与时空分布特征 徐建辉, 江洪 (3119)

宁波市 PM_{2.5} 中碳组分的时空分布特征和二次有机碳估算 杜博涵, 黄晓锋, 何凌燕, 胡敏, 王川, 任宇超, 应红梅, 周军, 汪伟峰, 许丹丹 (3128)

青岛大气中酸碱气体及 PM_{2.5} 中水溶性离子的浓度特征和气粒平衡关系 周佳佳, 石金辉, 李丽平, 姚小红, 高会旺 (3135)

北京雾霾天大气颗粒物中微生物气溶胶的浓度及粒谱特征 胡凌飞, 张柯, 王洪宝, 李娜, 王洁, 杨文慧, 殷喆, 焦周光, 温占波, 李劲松 (3144)

2015 年春节北京市空气质量分析 程念亮, 陈添, 张大伟, 李云婷, 孙峰, 魏强, 刘嘉林, 刘保献, 孙瑞雯 (3150)

上海市大气挥发性有机化学消耗与臭氧生成的关系 王红丽 (3159)

生物滴滤塔净化氯代烃混合废气的研究 陈东之, 缪孝平, 欧阳杜娟, 叶杰旭, 陈建孟 (3168)

一种基于 GOCI 数据的叶绿素 a 浓度三波段估算模型 郭宇龙, 李云梅, 李渊, 吕恒, 刘闯, 王旭东, 张思敏 (3175)

巢湖溶解性有机物时空分布规律及其影响因素 叶琳琳, 吴晓东, 刘波, 闫德智, 张攻琪, 周阳 (3186)

河北洹河溶解性有机物光谱学特性 虞敏达, 张慧, 何小松, 檀文炳, 张媛, 马丽娜, 席北斗, 党秋玲, 高如泰 (3194)

东山岛地下水“三氮”空间分布特征 吴海燕, 傅世锋, 蔡晓琼, 汤坤贤, 曹超, 陈庆辉, 梁修雨 (3203)

重庆典型岩溶区地下河中溶解态正构烷烃、脂肪酸来源、迁移及转化 梁作兵, 孙玉川, 王尊波, 师阳, 江泽利, 张媚, 谢正兰, 廖昱 (3212)

硫酸对乌江中上游段岩溶水化学及 δ¹³C_{DIC} 的影响 黄奇波, 覃小群, 刘朋雨, 张连凯, 苏春田 (3220)

阆中市思依镇水化学特征及其成因分析 张艳, 吴勇, 杨军, 孙厚云 (3230)

东南沿海河流-水库系统藻类生长营养盐限制季节变动 陈聪聪, 饶拉, 黄金良, 白敏冬 (3238)

水体氮磷营养盐水平与氯霉素浓度复合水体对苦草的生理生化影响 胡珍珍, 崔益斌, 李梅, 余静 (3248)

溶藻活性物质对棕囊藻溶藻及其脂肪酸影响的模拟 杨秋婵, 赵玲, 尹平河, 谭烁, 舒万姣, 侯少玲 (3255)

坡岸截留强化处理设施在不同运行条件下对农业面源污染物去除效果 李怀正, 陈珂莉, 危忠, 王卫刚 (3262)

典型材料屋面积尘重金属形态分布与风险评估 李敦柱, 管运涛, 刘安, 李思远 (3269)

南水北调丹江口水库水氯(胺)化消毒副产物产生特性与消毒工艺对比 张民盛, 徐斌, 张天阳, 程拓, 夏圣骥, 楚文海 (3278)

臭氧-混凝交互作用对混凝效果的影响 刘海龙, 郭雪峰, 王敏慧, 焦茹媛, 石健 (3285)

含溴水臭氧化过程阴离子对溴酸盐生成的影响 吴悦, 吴纯德, 刘吕刚, 袁博杰 (3292)

厌氧环境雌黄溶解产物形态的 XAS 研究 王莹, 许丽英, 王少锋, 肖翻, 贾永锋 (3298)

印染及染料行业废水生物处理系统中的 AOX 污染研究 申洋洋, 刘锐, 徐灿灿, 舒小铭, 许江军, 兰亚琼, 陈吕军 (3304)

螺旋霉素制药废水处理过程中耐药菌和抗性基因的转归特征 覃彩霞, 佟娟, 申佩弘, 魏源送 (3311)

两种膜生物反应器处理养猪沼液的比较研究 税勇, 川岸朋树, 宋小燕, 刘锐, 陈吕军 (3319)

农村污水膜生物反应器系统中微生物群落解析 孔晓, 崔丙健, 金德才, 吴尚华, 杨波, 邓晔, 庄国强, 庄绪亮 (3329)

四区一体反应器冬季启动脱氮特性及硝化菌群结构分析 张岩, 孙凤侠, 谢杭冀, 陈敬, 睦稀, 甘志明, 王修平, 史扬 (3339)

从亚硝酸还原厌氧氨氧化转变为硫酸盐型厌氧氨氧化 刘正川, 袁林江, 周国标, 李晶 (3345)

提高有机负荷对好氧颗粒污泥形成与稳定过程的影响 刘小鹏, 王建芳, 钱飞跃, 王琰, 陈重军, 沈耀 (3352)

常规施肥条件下农田不同途径氮素损失的原位研究, 以长江中下游地区夏玉米季为例 桑蒙蒙, 范会, 姜珊珊, 蒋静艳 (3358)

水氮组合模式对双季稻甲烷和氧化亚氮排放的影响 傅志强, 龙攀, 刘依依, 钟娟, 龙文飞 (3365)

厌氧条件下砂壤水稻土 N₂、N₂O、NO、CO₂ 和 CH₄ 排放特征 曹娜, 王睿, 廖婷婷, 陈诺, 郑循华, 姚志生, 张海, Klaus Butterbach-Bahl (3373)

黄土丘陵区不同有机碳背景下侵蚀坡面土壤呼吸特征 陈盖, 许明祥, 张亚锋, 王超华, 樊会敏, 王闪闪 (3383)

生物炭添加对半干旱地区土壤温室气体排放的影响 郭艳亮, 王丹丹, 郑纪勇, 赵世伟, 张兴昌 (3393)

宁南山区林地土壤原位矿化过程中碳氮转化耦合特征 倪银霞, 黄懿梅, 牛丹, 赵彤, 闫浩, 蒋跃利 (3401)

石漠化山地植被恢复过程土壤团聚体氮分布及与氮素矿化关系研究 胡宁, 马志敏, 蓝家程, 伍宇春, 陈高起, 傅瓦利, 文志林, 王文净 (3411)

江汉平原农田土壤有机碳分布与变化特点: 以潜江市为例 王玉竹, 肖和艾, 周萍, 童成立, 葛体达, 曾冠军, 吴金水 (3422)

缙云山不同土地利用方式下土壤团聚体中活性有机碳分布特征 李睿, 江长胜, 郝庆菊 (3429)

西北典型工矿型城市街道尘埃重金属污染的环境磁学响应 聂燕, 王新, 王博, 许淑婧, 高福元, 余晔, 夏敦胜, 夏听鸣 (3438)

电镀厂周边环境重金属分布特征及人体健康暴露风险评估 郭鹏然, 雷永乾, 周巧丽, 王畅, 潘佳钊 (3447)

典型电力电容器污染土壤中多氯联苯水平及特性 刘洁, 李晓东, 赵中华, 祁志福, 陈彤, 严建华 (3457)

紫色土对硫丹的吸附与解吸特征 赵炎, 郑国灿, 朱恒, 张进忠, 朱秀英, 胡淑春, 吴娅林 (3464)

紫茉莉对石油污染盐碱土壤微生物群落与石油烃降解的影响 焦海华, 崔丙健, 吴尚华, 白志辉, 黄占斌 (3471)

4 株外生菌根真菌对 Al³⁺ 吸收与吸附的研究 王明霞, 袁玲, 黄建国, 周志峰 (3479)

长春市郊区蔬菜有机磷农药残留与健康风险评价 于锐, 刘景双, 王其存, 刘强, 王洋 (3486)

北京市北神树生活垃圾填埋场产甲烷菌的群落结构和演替规律 宋立娜, 王磊, 夏孟婧, 苏月, 李振山 (3493)

城市分散式粪便颗粒化有机肥用作叶菜肥的肥力及环境影响 吕文洲, 乔宇祥, 余宁, 史荣华, 王光明 (3501)

V₂O₅-WO₃/TiO₂ 催化剂与活性炭混合降解气相二噁英 任咏, 纪莎莎, 俞明峰, 李晓东, 严建华 (3508)

基于出行服务的纯电动公交车节能减排效益分析 林晓丹, 田良, 吕彬, 杨建新 (3515)

我国挥发性有机物定义和控制指标的探讨 江梅, 邹兰, 李晓倩, 车飞, 赵国华, 李刚, 张国宁 (3522)

异化铁还原对土壤中重金属形态转化及其有效性影响 司友斌, 王娟 (3533)

《环境科学》征订启事 (3297) 《环境科学》征稿简则 (3303) 信息 (3127, 3202, 3277, 3318)

东山岛地下水“三氮”空间分布特征

吴海燕¹, 傅世锋^{1*}, 蔡晓琼¹, 汤坤贤¹, 曹超¹, 陈庆辉¹, 梁修雨²

(1. 国家海洋局第三海洋研究所, 厦门 361005; 2. 南京大学水科学研究中心, 南京 210093)

摘要: 东山岛地下水是岛上居民饮用水、生活用水、农业灌溉、淡水养殖的主要来源. 研究东山岛地下水中“三氮”的空间分布特征及其变异规律、污染来源、影响因素, 对了解东山岛地下水“三氮”污染状况、“三氮”污染的控制和防治、居民健康风险控制等具有重要的意义. 本研究应用地统计学方法分析了东山岛地下水中“三氮”含量的空间变异特征, 采用 Kriging 方法对未观测点进行趋势面分析, 并分析了东山岛地下水中“三氮”的污染特征. 结果表明, 东山岛地下水氨氮和亚硝酸盐氮的含量总体较低, 但空间变异性较大, 自相关性较差, 而硝酸盐氮的含量普遍较高, 空间分布表现为中等变异, 空间自相关性较好; “三氮”在全岛的空间分布特征相似, 浓度高值区均分布在近海陆域; 城镇和村庄生活污染和人畜排泄物是东山岛地下水“三氮”污染的主要来源, 是东山岛地下水污染控制的首要措施; 土地利用类型、土壤类型、地下水埋深、pH、溶解氧、季节和 Fe^{2+} 等都是影响东山岛地下水中“三氮”迁移转化的要素, 是东山岛地下水氮污染治理需要考虑的因素.

关键词: 东山岛; 地下水; 氨氮; 亚硝酸盐氮; 硝酸盐氮; 空间分布特征; 评价

中图分类号: X523; X82 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2015)09-3203-09 DOI: 10.13227/j.hjxx.2015.09.011

Spatial Variation of Ammonia-N, Nitrate-N and Nitrite-N in Groundwater of Dongshan Island

WU Hai-yan¹, FU Shi-feng^{1*}, CAI Xiao-qiong¹, TANG Kun-xian¹, CAO Chao¹, CHEN Qing-hui¹, LIANG Xiu-yu²

(1. The Third Institute of Oceanography, State Oceanic Administration, Xiamen 361005, China; 2. Center for Hydrosociences Research, Nanjing University, Nanjing 210093, China)

Abstract: In Dongshan Island, groundwater is the main resource of the local residents' drinking water, domestic water, agriculture irrigation and freshwater aquaculture. This study aimed to investigate the spatial distribution characteristic and its variation pattern of ammonia-N, nitrate-N and nitrite-N in groundwater, as well as its pollution source and influence factors. It is very important to understand the pollution level of ammonia-N, nitrate-N and nitrite-N in groundwater of Dongshan Island, the control and prevention of ammonia-N, nitrate-N and nitrite-N pollution, which is of great significance to the residents' health. In this study, the spatial variability characteristics of ammonia-N, nitrate-N and nitrite-N concentration in groundwater of Dongshan Island was analysed by geostatistic method, the values of the non-observation points were determined by Kriging method, and the pollution characteristics of ammonia-N, nitrate-N and nitrite-N in groundwater of Dongshan Island was also analyzed. Our results showed that the ammonia-N and nitrite-N concentration in groundwater of Dongshan Island were at low levels, but their spatial variability were high, and their autocorrelation were poor; however, the nitrate-N concentration was general high, its spatial variability was moderate, and the autocorrelation was much good. The distribution characteristics of ammonia-N, nitrate-N and nitrite-N in groundwater of Dongshan Island were similar that the high concentration areas were all located in the coastal land. The domestic pollutants and human and animal wastes from towns and villages were the main sources of nitrogen pollution, which would be the first step to control the nitrogen pollution of Dongshan Island. Land use pattern, soil type, groundwater depth, pH, dissolved oxygen, season, and the existence of Fe^{2+} were the impact factors that influence the distribution and transformation of ammonia-N, nitrate-N and nitrite-N in groundwater, which could be the considerable factors in the control of nitrogen pollution in groundwater of Dongshan Island.

Key words: Dongshan Island; groundwater; ammonia-N; nitrate-N; nitrite-N; spatial variation; evaluation

地下水环境中, 主要的氮化合物为离子态的氨氮 (NH_4^+ -N)、亚硝酸盐氮 (NO_2^- -N)、硝酸盐氮 (NO_3^- -N), 简称“三氮”. 由于硝酸盐的易溶性和 NO_3^- -N 不易被土壤吸附的性质^[1], 天然条件下浅层地下水的“三氮”存在形式以 NO_3^- -N 为主体, 而 NO_2^- -N 因化学性质和环境毒性最大常被视为重要的氮污染标志. 由于农业的发展, 化肥使用量的增加, NO_3^- -N 和 NO_2^- -N 成为世界普遍的地下水污染物^[2, 3], 由此引起的环境和健康问题也引起了广泛

的关注.

在许多发展中国家和地区, 尤其是农村偏远地区、水资源匮乏的区域, 地下水是主要的饮用水以及农业生产用水来源, 因此地下水的状况与人

收稿日期: 2015-02-08; 修订日期: 2015-04-27

基金项目: 国家海洋局第三海洋研究所基本科研业务专项(海三科2013021)

作者简介: 吴海燕(1983~), 女, 博士, 助理研究员, 主要研究方向为近岸海域、海岛生态评价, E-mail: wuhaiyan@tio.org.cn

* 通讯联系人, E-mail: fushifeng@tio.org.cn

们的生产生活息息相关. 地下水中过多的氮可能对人类和其他动物产生毒性^[4]. 水体中氨氮超标, 可以引起胃炎、痢疾和传播性疾病; 亚硝酸盐可以和蛋白质结合形成强致癌物亚硝胺^[5]; 饮用水中的硝酸盐已经被证实与婴儿的高铁血红蛋白症和成年人的胃癌有关^[6], 并会导致消化不良和肠胃问题^[7]. 因此, 世界卫生组织 (World Health Organization, WHO)、欧盟以及许多国家都对饮用水中“三氮”的最大允许浓度进行了规定. 地下水中过量的氮还可能导致关联水体的富营养化^[8]. 另外, 过量施氮肥并不能使作物产量进一步提高, 反而造成肥料利用率及产量降低, 导致硝酸盐在植物体内大量累积^[9]. 因此, 地下水中的“三氮”含量是衡量水质的重要指标, 研究其空间分布特征, 对地下水中“三氮”污染的控制和防治具有重要的意义.

海岛四面环水, 大多数没有地表水体, 因此海岛大多存在着水资源短缺的问题. 地下水是海岛水资源的重要组成部分, 对海岛及其周边海域生态系统的维持、海岛居民的生产生活有极其重要的影响. 因此, 本研究以东山岛为例, 对东山岛地下水中“三氮”的分布特征、空间变异特征、污染来源、迁移转化影响因素等进行研究和分析, 以期对海岛地下水中氮污染的控制和治理提供科学的依据.

1 材料与方法

1.1 研究区概况

东山岛位于北纬 $23^{\circ}34' \sim 23^{\circ}47'$, 东经 $117^{\circ}18' \sim 117^{\circ}35'$ 之间, 是福建省最南端的海岛, 海岛面积约 194 km^2 , 总人口 20.33 万人. 东山岛四面环海, 属东南亚热带海洋性气候, 平均年降雨量 $1\,256.00 \text{ mm}$, 全年平均气温 20.9°C , 岛内无大的地表水系, 仅山前发育 4 条长度几千米的短小溪沟, 多呈间歇性流水. 据水文计算, 全岛多年平均年水资源总量 0.906 亿 m^3 , 人均水资源量 450 m^3 , 仅为福建省人均的 13% ^[10]. 东山岛地下水类型为第四系孔隙水, 含水层主要由风积、海积的中细砂、细砂组成, 地下水埋深较浅, 防污性能较差, 易受污染. 补给来源主要是大气降水.

地下水是东山岛上居民饮用水、生活用水、农业灌溉、淡水养殖的主要来源. 岛上地下水饮用水水源主要以东南部的康美 (康美村)、梧龙 (梧龙村)、白垵 (大路口村) 3 个水源地为主^[11]. 生活用水、农业灌溉和淡水养殖用水全部来自于普通水井或者真空井.

1.2 采样时间和方法

2014 年, 根据东山岛城镇居民、村庄、农田的空间分布状况, 结合地形、土壤类型因素, 选取了有代表性的 71 口水井进行地下水采样分析 (图 1), 采样时间为枯水季 (1~3 月) 和丰水季 (6~9 月). 为减轻降雨对水质的影响, 取样通常在降雨过后 7 d 开始. 采样前均用待采水样润洗样品瓶 3 次. 采集 250 mL 水样装入棕色瓶并冷藏, 直至采样全部完成运送至实验室分析.

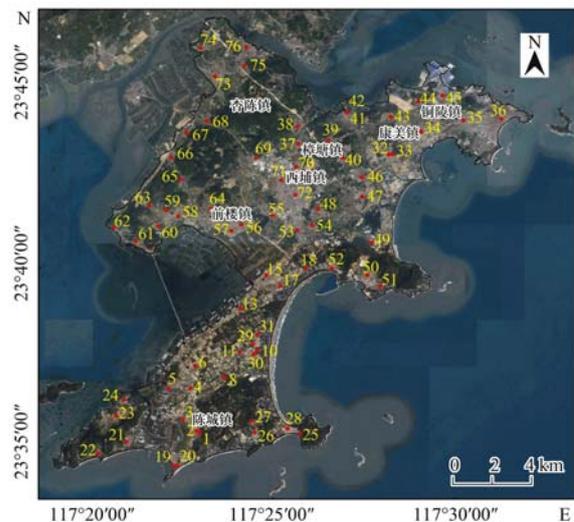


图 1 东山岛地下水采样站点示意

Fig. 1 Location of the sampled wells in Dongshan Island

1.3 实验方法

地下水的温度、盐度、pH 和溶解氧 (dissolved oxygen, DO) 指标采用便携式多参数分析仪 (MULTT3430) 现场测定; 地下水水位采用 Solinst 101 水位计现场测定; “三氮”采用 ALLIANCE console future 连续流动分析仪进行分析; 氯离子采用实验室硝酸银容量法测定.

1.4 地统计学方法

本研究利用地统计学方法分析地下水“三氮”空间变异性. 地下水氮污染物 $M(x)$ 是取样点 x 的函数, 同样, 与 x 点相距 h 点的地下水氮污染物浓度记为 $M(x+h)$, h 为滞后距; 这样可以组成位差为 h 的若干组数据. 地下水氮污染物浓度的数学期望为常数, 它与取样位置无关, 即:

$$E[M(x)] = \mu \quad (1)$$

理论上, 随机变量的半方差函数为:

$$\gamma(h) = \frac{1}{2}E[M(x) - M(x+h)]^2 \quad (2)$$

实际工作中, 半方差的计算公式为:

$$\gamma(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [M(x_i) - M(x_i + h)]^2 \quad (3)$$

式中, μ 是样本均值; E 是对样本取均值的函数符号; $\gamma(h)$ 是间距为 h 的半方差, 该值随 h 的增大而增大; $N(h)$ 是间距为 h 的计算对数.

实际上, 观测点的分布是散乱的, 对平稳区域化变量 $M(x)$ 先算出每个观测点与其他观测点之间的距离 h_{is} , 若观测点有 N 个, 则有 $N(N-1)/2$ 个 h_{is} , 然后把观测点间距分成 P 个级别, 取其可能点数据对数 $(x_i, x_{is}) = (x_i, x_i + h_{is})$, 并算出该距离的平均距离 h_s 、点对数 $N(h_s)$ 和观测值平方和的平均值, 则变异函数 $\gamma(h_s)$ 为:

$$\gamma(h) = \frac{1}{2N(h_s)} \sum_{i=1}^N [M(x_i + h_{is}) - M(x_i)]^2 \quad (4)$$

$(s = 1, 2, \dots, P)$

式中, h_s 为第 s 级空间不同点之间的样本距, 又称滞后距 (lag distance). 据此可以得到 P 组数据 h_{is} 、 $N(h_s)$ 和 $\gamma(h_s)$, 由此可以得出 $\gamma(h)$ - h 关系曲线. 已存在多种模型能描述 $\gamma(h)$ - h 关系曲线, 包括: 线性模型, 球状模型, 指数模型和高斯模型.

2 结果与分析

2.1 常规统计分析

由表 1 可知, 采样点“三氮”的浓度在枯水期和丰水期有明显的差异. NO_3^- -N 和 NH_4^+ -N 枯水期的平

均浓度要高于丰水期, 而 NO_2^- -N 则相反. NO_3^- -N 的空间变异程度为中度变异, NO_2^- -N 和 NH_4^+ -N 则为高强度变异, 但“三氮”的空间变异规律一致, 即枯水期的空间变异程度都要高于丰水期.

对照我国地下水水质标准, 枯水期 71 个样本中, NO_3^- -N、 NO_2^- -N 和 NH_4^+ -N 超过 III 类标准的样本比例分别为 57.8%、9.9% 和 7.0%; 丰水期 64 个样本中, 超过 III 类标准的样本比例分别为 42.2%、12.5% 和 7.8%. 对照 WHO 饮用水标准 (1998), NO_3^- -N、 NO_2^- -N、 NH_4^+ -N 最大允许浓度分布为 11.3 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ (以 N 计)、0.91 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ (以 N 计) 和 1.5 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 则枯水期 71 个样本中, NO_3^- -N 和 NH_4^+ -N 超标比例分别为 73.0% 和 5.6%, 丰水期 64 个样本中, NO_3^- -N 和 NH_4^+ -N 超标比例分别为 73.4% 和 3.1%, NO_2^- -N 则都未有超标现象. 由此可见, 东山岛大部分调查井的地下水都不能满足我国以及 WHO 的饮用水要求.

表 2 将本次调查的数据和东山岛 2004 年和 2007 年的调查数据^[8]进行了对比: 东山岛地下水中 NO_3^- -N 的浓度呈明显的增加的趋势; NO_2^- -N 则总体下降, 但 2014 年比 2007 年有所提高; NH_4^+ -N 的总体呈增加的趋势. 对比 2007 年, 2014 年 NO_2^- -N 和 NH_4^+ -N 的空间变异系数, 远远高于 2007 年, 而 NO_3^- -N 的空间变异系数要低于 2007 年 (1.002).

表 1 东山岛地下水“三氮”含量枯水期和丰水期统计分析结果

Table 1 Statistical analysis of ammonia-N, nitrate-N, and nitrite-N content in groundwater of Dongshan Island in wet and dry season, respectively

项目	类型	样本数	最小值	最大值	平均值	标准差	变异系数
NO_3^- -N	枯水期	71	1.72	72.5	23.316	14.993	0.643
	丰水期	64	0.307	49.33	18.587	11.310	0.608
NO_2^- -N	枯水期	71	0	0.768	0.0237	0.0984	4.146
	丰水期	64	0	0.758	0.0598	0.175	2.935
NH_4^+ -N	枯水期	71	0.0234	35.246	0.727	4.320	5.947
	丰水期	64	0.004	17.49	0.386	2.211	5.725

表 2 东山岛地下水“三氮”浓度年际变化/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$

Table 2 Variation of ammonia-N, nitrate-N, and nitrite-N in groundwater of Dongshan Island between 2004, 2007 and 2014/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$

年份	NO_3^- -N	NO_2^- -N	NH_4^+ -N
2004	14.72	0.111	0.41
2007 (仅农村地区)	17.6	0.01	0.271
2014	20.95	0.0418	0.557

2.2 空间结构特征及分布

2.2.1 空间趋势分析

图 2 为丰水期地下水“三氮”空间分布趋势, 其

中左后投影面上的曲线表示东西向的全局性趋势效应变化, 右后投影面上的曲线表示南北向的全局性趋势效应变化. 从中可见, 东山岛地下水 NH_4^+ -N 和 NO_2^- -N 空间分布随机性较大, 不具有明显的空间趋势. NO_3^- -N 全局性趋势 S 形, 表明具有一定程度的 3 阶趋势效应, 即在中部区域 NO_3^- -N 浓度较低, 在北部和南部浓度较高.

2.2.2 空间变异性分析

利用地质统计学软件 GS + 9, 根据公式 (4) 计

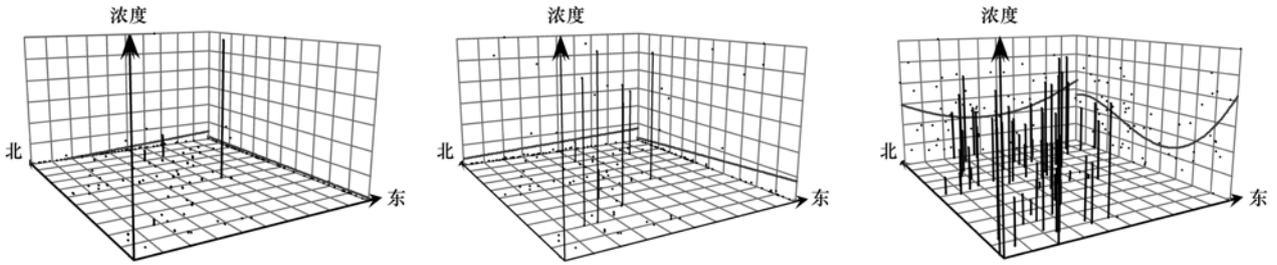


图 2 东山岛地下水“三氮”丰水期空间分布趋势

Fig. 2 Trend analysis of ammonia-N, nitrite-N and nitrate-N in groundwater of Dongshan Island for wet season, respectively

算出丰水期地下水中“三氮”的实验半方差函数值(γ)。半方差(γ)与滞后距离(h)关系及其拟合的理论曲线如图 3 所示,拟合参数如表 3 所示。由图 3 可知, NH_4^+ -N 和 NO_2^- -N 的半方差(γ)与滞后距离(h)相关性较差,用线性模型拟合效果也较差(表 3)。表明 NH_4^+ -N 和 NO_2^- -N 空间相关性较差,变异性较大。

相比 NH_4^+ -N 和 NO_2^- -N, 地下水中 NO_3^- -N 的空间相关性较好,半方差函数可用球状模型拟合(图 3),拟合度 R 为 0.71(表 3)。块金值(C_0)为 20.6,表明在较小尺度上由随机引起的空间变异性较大; $[C_0/(C_0 + C)]$ 为 17%,表明由随机部分引起的空间变异性占一小部分,大部分的空间变异性由区域属性引起的,这主要是因为 NO_3^- -N 较为稳定,易随着地下水流动,地下水的空间流动性与连通性是 NO_3^- -N 空间分布的主要控制因素。东山岛浅层含水层全区分布,地下水连通性较好,所以 NO_3^- -N 空间变异性由区域属性控制。 NO_3^- -N 的变程为 3.08 km,表明 NO_3^- -N 在 3.08 km 范围内自相关性较好。

表 3 东山岛地下水“三氮”半方差模型参数

Table 3 Parameters of the semivariogram model of ammonia-N, nitrite-N and nitrate-N in groundwater of Dongshan Island

参数	NH_4^+ -N	NO_2^- -N	NO_3^- -N
模型	线性模型	线性模型	球状模型
块金(C_0)	10.4	0.001 5	20.6
基台($C_0 + C$)	33.5	0.001 5	117.9
$C_0/(C_0 + C)/\%$	31	100	17
变程(h)/m	—	—	3 080
拟合度	0.51	0.43	0.71

2.2.3 “三氮”空间分布特征及污染评价

根据所得到的半方差函数模型,利用 Kriging 最优内插法进行趋势面分析,并绘制了东山岛“三氮”含量的等值线图(图 4)。

由图 4 和图 5 可知,东山岛地下水中“三氮”的浓度空间分布规律在丰水期和枯水期有着显著的差

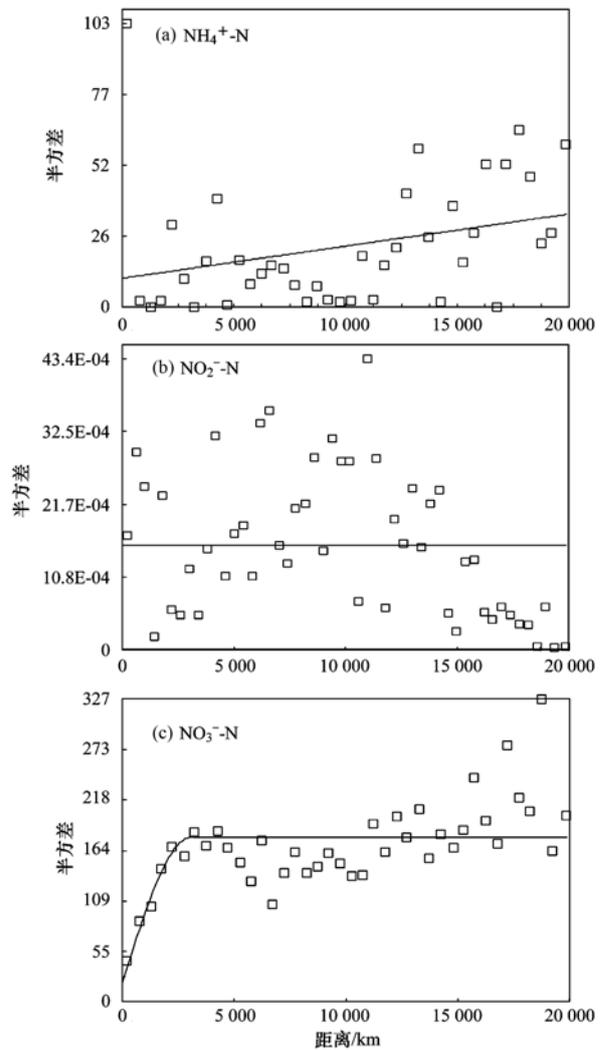


图 3 东山岛地下水“三氮”半方差模型

Fig. 3 Semivariogram model of ammonia-N, nitrate-N and nitrite-N in groundwater of Dongshan Island, respectively

异。枯水期 NH_4^+ -N 浓度高值区主要分布在岛南部的官前村、中东部的冬古村和北部的杏陈镇,国标超标面积 44.7 km^2 (表 4),占全岛面积的 22.9%; 丰水期 NH_4^+ -N 浓度高值区主要分布在岛北部的港西村和中东部的冬古村,超标面积 39.1 km^2 ,占全岛面积的 20.0%。 NH_4^+ -N 对人体健康没有直接的风

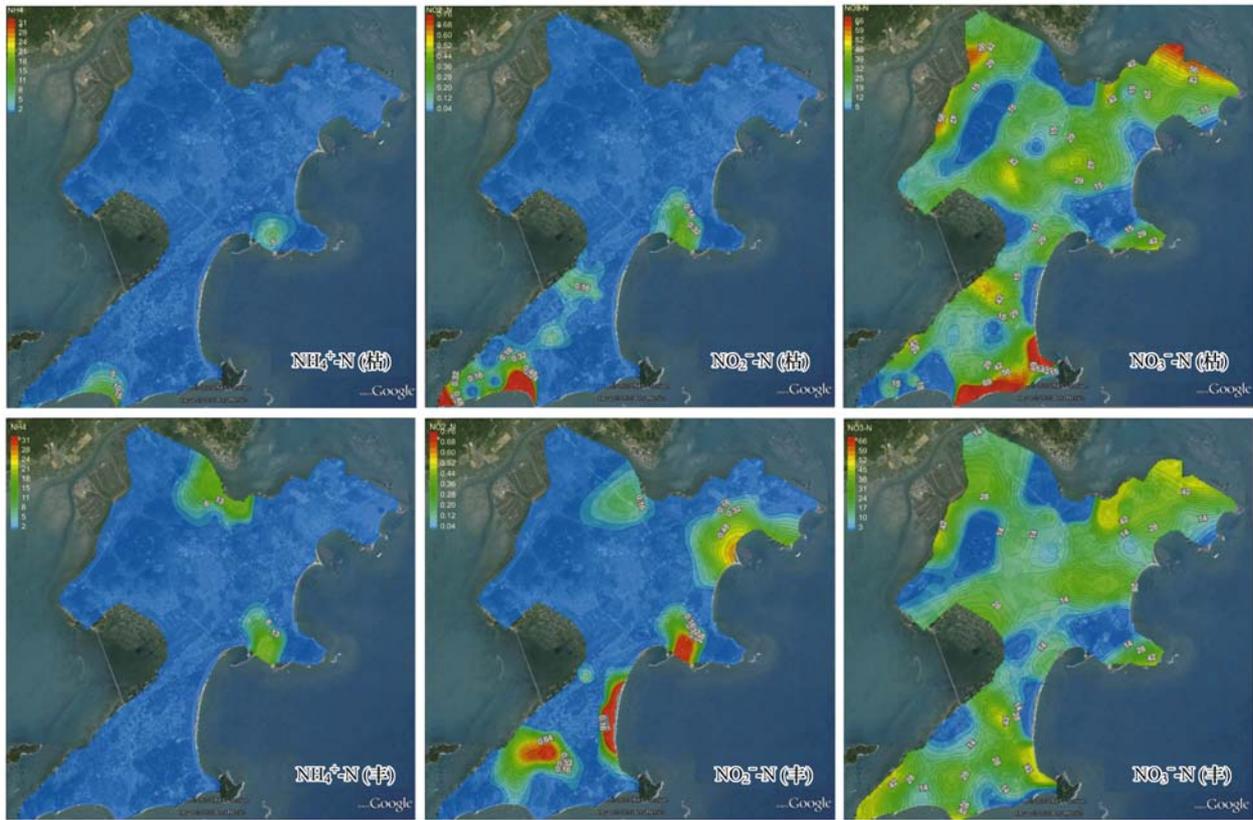


图 4 东山岛地下水“三氮”枯水期和丰水期等值线

Fig. 4 Contour map of ammonia-N, nitrite-N and nitrate-N in groundwater of Dongshan Island for dry and wet season, respectively

表 4 东山岛地下水“三氮”丰水期和枯水期污染评价(2014)

Table 4 Pollution assessment on ammonia-N, nitrate-N and nitrite-N in groundwater of Dongshan Island for wet season and dry season, respectively (2014)

项目	类型	$\text{NH}_4^+ \text{-N}$	$\text{NO}_2^- \text{-N}$	$\text{NO}_3^- \text{-N}$	样本数
国标超标面积/ km^2	枯水期	44.7	37.4	93.5	71
	丰水期	39.1	70.5	83.8	64
WHO 超标面积/ km^2	枯水期	11.9	0	133.5	71
	丰水期	18.2	0	133.2	64

险,但 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 的存在意味着地下水正受到新的污染^[5],较高的 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 浓度表明存在严重的生活或者农业污染^[2].

枯水期 $\text{NO}_2^- \text{-N}$ 浓度高值区主要分布在岛西北部的大部分区域和中东部的冬古村,超标面积 37.4 km^2 ,占全岛面积的 19.1% ;丰水期 $\text{NO}_2^- \text{-N}$ 浓度高值区主要分布在岛西南部的后姚村和陈城村、东南部的山口村、东北部的美山村和马厝村、南部的港西村,超标面积 70.5 km^2 ,占全岛面积的 36.0% . $\text{NO}_2^- \text{-N}$ 在丰水期的平均浓度和超标面积都要高于枯水期,主要是由于丰水期降雨量大,促进了反硝化反应,使得 $\text{NO}_2^- \text{-N}$ 浓度增高.

枯水期 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 除了海拔较高的地方其他区域浓

度都很高,最高值出现在岛最南部的宫前村,达到 $72.5 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,超标面积 93.5 km^2 ,占全岛面积的 47.8% ;丰水期 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 浓度仍然普遍较高,但平均值、最大值以及超标面积较枯水期明显有所降低,超标面积 83.8 km^2 ,占全岛面积的 42.8% .丰水期的 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 浓度降低的原因在于降雨量大稀释了浓度,同时反硝化反应也使得 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 浓度有所降低.

研究表明,地下水中的 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 浓度超过 $13 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 就可以判断地下水受到了人类活动的影响,称为人类影响阈值^[12].本研究中,东山岛丰水期71个样本中,68.8%的水井受到了人类影响,影响面积 131.2 km^2 ,占全岛面积的 67.1% ;枯水期64个样本中68.8%的水井受到了人类影响,影响面积

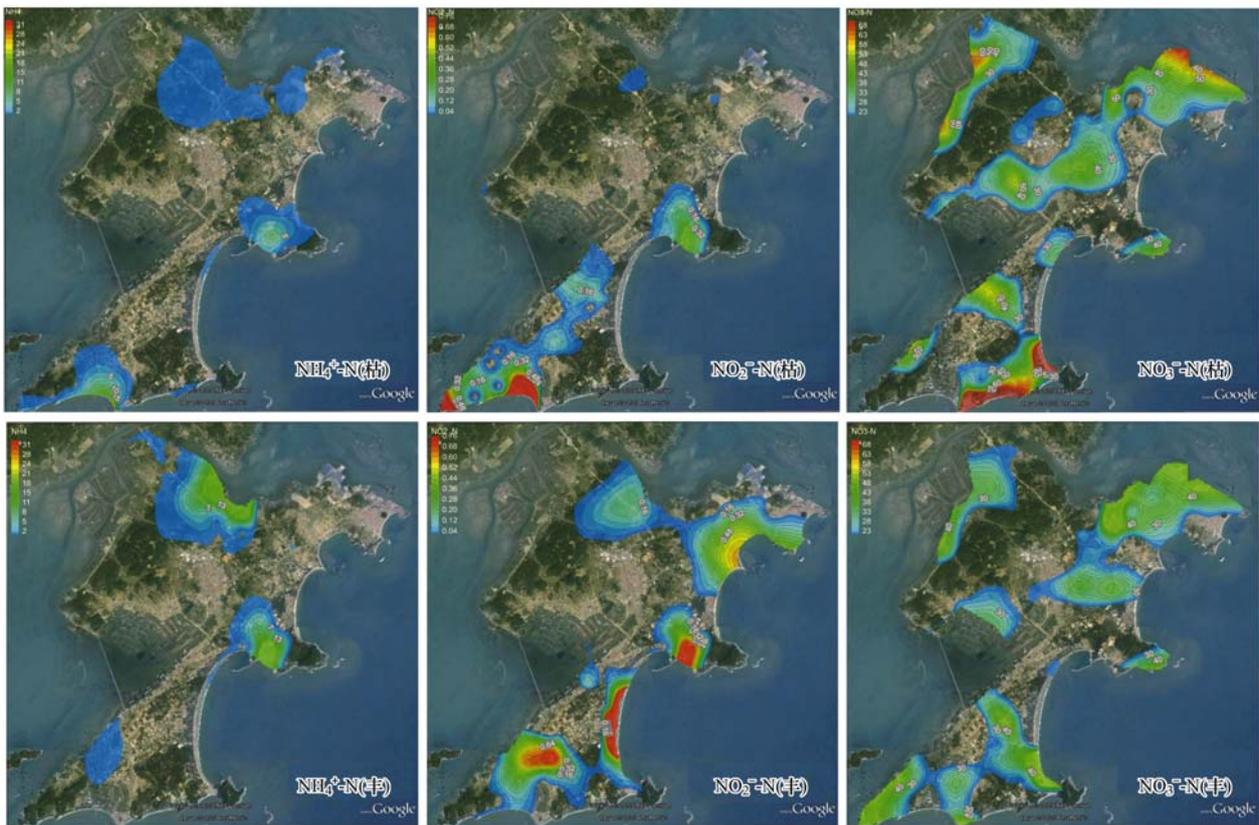


图5 “三氮”枯水期和丰水期超标面积分布

Fig. 5 Areas distribution of ammonia-N, nitrate-N and nitrite-N exceeding the Third class standard of Chinese quality status for groundwater in dry and wet season

127.5 km², 占全岛面积的 65.2%。说明东山岛受到人类生产生活的深刻影响。

3 “三氮”的污染来源及其迁移转化影响因素分析

3.1 “三氮”的来源分析

弄清地下水“三氮”的来源,对于有效控制地下水氮污染具有十分重要的意义^[13]。东山岛地下水中“三氮”的人为来源主要包括:①人类产生的生活污染物及人畜的排泄物;②农田中施放的肥料(氮肥);③内陆地区、近海陆域的海水养殖。研究表明,由于Cl⁻主要来源于人类污染,并且和NO₃⁻-N在土壤中是以相似的方式移动,不受生物活动的影响,因此通过进行Cl⁻和NO₃⁻-N的相关性分析,可以得知NO₃⁻-N的大概来源。根据表5,NO₃⁻-N和Cl⁻显著正相关,而且NO₂⁻-N、NH₄⁺-N也和Cl⁻显著相关,说明东山岛地下水中“三氮”的来源主要为生活污染和人畜排泄物^[14]。

东山岛的土地利用类型主要为村庄、城镇、农田(主要种植蔬菜)和林地。各土地类型地下水中“三氮”的浓度比较见表6。NO₃⁻-N的分布规律为城

镇>村庄>农田>林地,NH₄⁺-N在村庄的平均浓度远远高于其他土地利用类型,NO₂⁻-N则差异不大。由此可见,村庄和城镇地下水氮污染最为严重,这与“三氮”主要来源于生活污染物和人畜排泄物的分析结果一致。生活污染物和人畜排泄物污染地下水的主要原因在于两个方面:①东山岛大部分地区为农村,村庄和部分城镇均没有完善的污水管网和污水处理系统,生活污染物和人畜粪便的排放没有良好的管理;②东山岛的土壤含砂量高,且地下水埋深较浅,污染物极易下渗污染地下水。

尽管农业是东山岛的基础产业之一,并且地下水是农业灌溉的唯一来源,但根据表6,农田中NH₄⁺-N和NO₃⁻-N的平均浓度要低于村庄和城镇,并且丰水期的平均浓度要高于枯水期,这与村庄和城镇的分布规律相反。东山岛的农业种植主要以蔬菜为主,包括芦笋、地瓜、韭菜、白萝卜和胡萝卜等,且具有很强的季节性,一般一年只有半年的种植期,为第一年的11月到来年的4、5月的枯水期,而丰水期由于阳光照射强,蒸腾作用强烈不利于植物生长而较少种植。虽然丰水期采样期间大部分农田并

表 5 “三氮”和其他环境要素的相关性分析¹⁾

类型	项目	NO ₂ ⁻ -N	NH ₄ ⁺ -N	埋深	pH	DO	Cl ⁻
NO ₃ ⁻ -N	相关系数	0.040	-0.103	0.167	0.354 **	0.186 *	0.308 **
	显著性	0.642	0.236	.053	0.000	0.031	0.000
	样本数量	135	135	135	111	135	135
NO ₂ ⁻ -N	相关系数		0.466 **	-0.193 *	0.256 **	-0.181 *	0.183 *
	显著性		0.000	0.025	0.007	0.035	0.034
	样本数量		135	135	111	135	135
NH ₄ ⁺ -N	相关系数			-0.401 **	0.185	-0.184 *	0.233 **
	显著性			0.000	0.052	0.032	0.007
	样本数量			135	111	135	135

1) ** 表示相关性在 $P < 0.01$ 水平显著; * 表示相关性在 $P < 0.05$ 水平显著

表 6 不同土地利用类型“三氮”的浓度分布

项目	村庄		城镇		农田		林地	
	枯水期	丰水期	枯水期	丰水期	枯水期	丰水期	枯水期	丰水期
样本数量	53	48	7	5	10	10	1	1
NO ₃ ⁻ -N/mg·L ⁻¹	24.48	18.78	28.09	21.24	15.17	17.39	9.86	8.1
NO ₂ ⁻ -N/mg·L ⁻¹	0.031	0.067	0.0023	0	0.004	0.003	0.005	0.59
NH ₄ ⁺ -N/mg·L ⁻¹	0.96	0.50	0.038	0.015	0.040	0.046	0.036	0.068

没有种植,但是,农田在枯水期种植季节施的氮肥,在经过高温季节之后,大部分的氮肥已转化为 NO₃⁻-N(硝化作用的最适温度为 30~31℃),丰水期的降雨入渗将溶解大量的 NO₃⁻-N 而进入浅层地下水,引起硝酸盐积累^[1]。

由图 4 和图 5 可知“三氮”的浓度高值区(红色区域)主要分布在受人为活动和自然环境的双重影响的近海陆域,造成该区域“三氮”浓度较高的原因则既有人为因素,也有自然因素。例如岛东北角的铜陵镇和南部的宫前村(“三氮”的浓度均超标),部分区域为填海造陆区,地下水为咸淡水混合物,“三氮”的背景值就偏高;岛西南部的海水养殖完全深入陆地,对周边的环境造成了较大的影响,其周边也是“三氮”的高值区。由于海岛四面环海水,在海岛四周存在咸淡水过渡地带,因此近海陆域地下水中“三氮”的背景值本身就高于内陆地区。

3.2 自然条件对地下水“三氮”的影响

包气带作为“三氮”进入地下水的必经之路,其土壤结构对地下水氮污染的防护能力影响显著:土壤颗粒越细,土质越密实,渗透性能就越差,防护能力越强;土壤颗粒越粗,渗透越强,防护能力越弱。东山岛的土壤类型主要包括赤砂土、耕作风沙土、侵蚀赤红壤、渗育水稻田等^[15]。根据现场调查,将东山岛的土壤类型(包气带)根据含砂量大体划分为三类:砂质、砂土混合质和土质(图 6)。将这三类

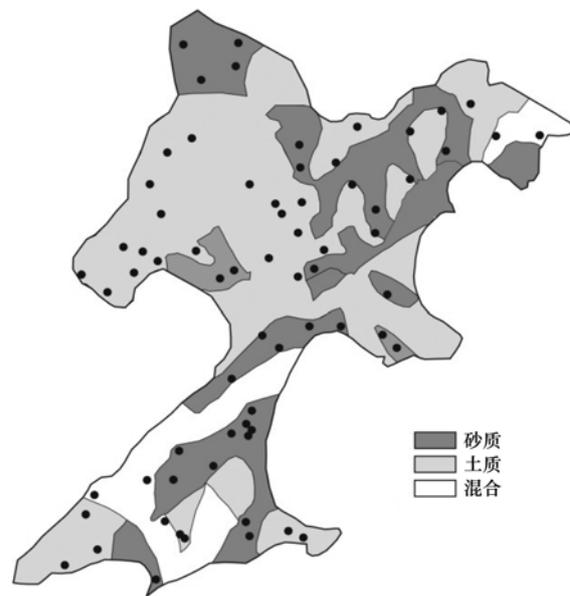


图 6 东山岛土壤类型分布示意

Fig. 6 Soil type distribution sketch of Dongshan Island

土壤中的“三氮”进行了比较和分析(表 7)。结果表明,东山岛地下水中“三氮”在不同的土壤介质中的表现不一致,与土壤类型有显著的关系。砂质土壤地下水中 NH₄⁺-N 和 NO₂⁻-N 平均浓度最高, NO₃⁻-N 最低;混合质土壤地下水中 NH₄⁺-N 平均浓度最低, NO₃⁻-N 最高;土质土壤地下水中 NH₄⁺-N 和 NO₃⁻-N 平均浓度中等, NO₂⁻-N 最低。表明砂质土壤由于渗透

性强, NH_4^+ -N更易直接进入污染地下水, 硝化程度低, 因此 NO_3^- -N的浓度最低; 相比土质土壤, 混合质

土壤质地较为疏松, 更易获得氧气, 有利于硝化反应的进行, 因此 NO_3^- -N的浓度最高。

表7 “三氮”在不同土壤介质地下水中的平均浓度

土壤类型	项目	样本数	NH_4^+ -N平均浓度 / $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	NH_4^+ -N样本 超标率/%	NO_2^- -N平均浓度 / $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	NO_2^- -N样本 超标率/%	NO_3^- -N平均浓度 / $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	NO_3^- -N样本 超标率/%
土质	枯水期	31	0.099	3.2	0.003	0	23.48	51.6
	丰水期	27	0.14	3.7	0.001	0	19.18	40.7
	平均		0.12	4.3	0.002	0	21.48	46.6
混合	枯水期	9	0.084	11.1	0.008	11.1	25.86	77.8
	丰水期	9	0.086	11.1	0.074	11.1	24.30	77.8
	平均		0.085	11.1	0.041	11.1	25.08	77.8
砂质	枯水期	31	1.54	9.7	0.049	19.4	22.41	58.1
	丰水期	28	0.72	10.7	0.11	25.0	16.18	32.1
	平均		1.15	10.2	0.079	22.0	19.45	45.8

地下水埋深(包气带的厚度)也是影响地下水中“三氮”浓度的重要因素, 地下水位越深, 包气带越厚, 增大了土壤水的下渗路程, 延缓了氮进入地下水的过程, 地下水受到外界环境和人类活动的影响越小, 越不容易受到污染^[16]. 将地下水埋深和“三氮”的浓度进行 Spearman 相关性分析(表4), 结果表明, 地下水埋深和 NO_2^- -N和 NH_4^+ -N浓度显著负相关, 说明地下水埋深越深, NO_2^- -N和 NH_4^+ -N的浓度越低. 许多实验和现场研究表明, NH_4^+ -N进入土壤后, 在包气带土层的浅表层被迅速吸附而减少, 因此 NH_4^+ -N的浓度随着土壤深度的增加而下降. 地下水埋深与 NO_3^- -N则没有明显的相关性.

3.3 地下水中“三氮”转化的影响因素

本研究比较分析了 NO_3^- -N、 NO_2^- -N和pH的关系(表8). 枯水期和丰水期同时测定 NO_3^- -N、 NO_2^- -N和pH的样本共111个, 其中, 54个偏酸性样本, NO_3^- -N和 NO_2^- -N的平均浓度比约为737; 56个偏碱性样本, NO_3^- -N和 NO_2^- -N的平均浓度比约为327. 在碱性的环境下, NO_2^- -N的平均浓度是酸性环

境的两倍多, 超标样本数量和比例也明显高于酸性环境. 同时, 表5的分析也表明pH和 NO_3^- -N、 NO_2^- -N显著相关($P < 0.01$). 一方面, 这主要是因为“三氮”的相互转化过程中细菌起到重要作用, 一般情况下, 酸性越强硝化细菌活性越强, 酸性越弱反硝化细菌活性越强^[17]. 另一方面, 这与东山岛地下水中较高的 Fe^{2+} 浓度有关. Fe^{2+} 是促进 NO_3^- -N和 NO_2^- -N转化的重要因素, Fe^{2+} 具有较强的还原性, NO_3^- 具有较强的氧化性, 中偏碱性溶液中会发生氧化还原反应, 生成 NO_2^- . 东山岛地下水铁的的含量较高, 2000年对东山岛代表性的地下水监测点的监测结果显示东山岛地下水中铁的质量浓度变化范围为 $0.03 \sim 12.0 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ^[10], 2001年和2007年其他科研项目对东山岛部分地区的地下水监测也表明存在铁超标现象^[11, 18]. 碱性条件下, 地下水中的 NO_3^- -N在 Fe^{2+} 的作用下, 更易转化为 NO_2^- -N, 使得地下水中 NO_2^- -N含量较高, 更容易超过饮用水标准. 由此可知, 东山岛部分区域地下水中的 Fe^{2+} 和碱性环境是导致东山岛部分区域 NO_2^- -N浓度较高的主要原因.

表8 酸性水样和碱性水样 NO_3^- -N和 NO_2^- -N的浓度比较

水样	样本数	NO_2^- -N平均值 / $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	NO_3^- -N平均值 / $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	NO_3^- -N/ NO_2^- -N 平均浓度比	NO_2^- -N超标样本数
酸性	54	0.03	18.56	737	5
碱性	56	0.07	22.89	327	9

溶解氧也是影响“三氮”转化的因素之一, 对“三氮”的转化有显著的影响. 通过对135个样品的 NH_4^+ -N、 NO_3^- -N和 NO_2^- -N与溶解氧的 Spearman 相关性分析(表5)表明, 溶解氧和 NO_3^- -N显著正相关($P < 0.05$), 和 NO_2^- -N、 NH_4^+ -N显著负相关($P <$

0.05). 这主要是由于溶解氧浓度越高, 有利于硝化反应的进行, 促进 NH_4^+ -N转化为 NO_3^- -N, 而同时反硝化速率可能越低, NO_3^- -N向 NO_2^- -N以及氮气转化的速率变慢, 氮更易以 NO_3^- -N的形式存在. 这与Gómez等^[19]的研究结果一致.

4 结论

(1) 东山岛地下水总体氮污染状况不容乐观, 尤其是 NO_3^- -N, 除海拔较高的山地, 约一半区域超出了我国地下水质量标准(GB/T 14848-1993) III类标准, 约90%超出了世界卫生组织制定的饮用水标准($10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$)。2014年东山岛地下水氮污染比2004年和2007年有加重的趋势, 因此, 东山岛地下水氮污染的控制和治理需要引起足够的重视。

(2) 东山岛地下水 NH_4^+ -N和 NO_2^- -N的含量总体较低, 但空间变异性较大, 自相关性较差, 而 NO_3^- -N的含量普遍较高, 空间分布表现为中等变异, 空间自相关性较好, 空间变异性由区域性因素控制。“三氮”在全岛的空间分布特征相似, 浓度高值区均分布在近海陆域。

(3) 城镇和农村的生活污染物和人畜粪便排放是东山岛地下水中的“三氮”主要来源, 是氮污染控制的首要因素, 东山岛亟需建立完善的污水收集处理管网。农业种植和内陆地区的海水养殖也是地下水中“三氮”的来源之一。

(4) 影响“三氮”在地下水中迁移转化的因素众多。总体而言, 枯水期氮污染较丰水期严重; NO_3^- -N在砂土混合质土壤地下水中浓度最高, NH_4^+ -N和 NO_2^- -N则在砂质土壤地下水中最高; 城镇地下水中 NO_3^- -N浓度明显高于村庄、农田和林地, 而村庄地下水中 NH_4^+ -N明显高于其他土地利用类型; 地下水埋深越深, NO_2^- -N和 NH_4^+ -N的浓度越低; 碱性条件下, 地下水中的 NO_3^- -N在 Fe^{2+} 的作用下, 更易于转化为 NO_2^- -N, 使得部分地下水中 NO_2^- -N超标; 溶解氧浓度越高, 有利于硝化反应, NO_3^- -N浓度越高。

参考文献:

- [1] 江德爱, 王永华, 唐懿达, 等. 含氮化合物在土壤和地下水中的迁移转化和积累——生活污水中含氮化合物进入土壤后的动态研究[J]. 环境科学, 1983, **4**(3): 29-34.
- [2] Umezawa Y, Hosono T, Onodera S, *et al.* Sources of nitrate and ammonium contamination in groundwater under developing Asian megacities [J]. *Science of the Total Environment*, 2008, **404**(2-3): 361-376.
- [3] Dragon K. Groundwater nitrate pollution in the recharge zone of a regional Quaternary flow system (Wielkopolska region, Poland) [J]. *Environmental Earth Sciences*, 2013, **68**(7): 2099-2109.
- [4] Liu C W, Wang Y B, Jang C S. Probability-based nitrate contamination map of groundwater in Kinmen [J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2013, **185**(12): 10147-10156.
- [5] 谢建华, 刘海静, 王爱武. 浅析氨氮、总氮、三氮转化及氨氮在水污染评价及控制中的作用[J]. 内蒙古水利, 2011, (5): 34-36.
- [6] Salvador P H, Manuel P V, Andrés S. A hydro-economic modelling framework for optimal management of groundwater nitrate pollution from agriculture [J]. *Journal of Hydrology*, 2009, **373**(1-2): 193-203.
- [7] Reddy A G S, Kumar K N, Rao D S, *et al.* Assessment of nitrate contamination due to groundwater pollution in north eastern part of Anantapur District, A. P. India [J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2009, **148**(1-4): 463-476.
- [8] 王庆锁, 顾颖, 孙东宝. 巢湖流域地下水硝态氮含量空间分布和季节变化格局[J]. 生态学报, 2014, **34**(15): 4372-4379.
- [9] 郭金芝, 金东日, 杜长青, 等. 施肥对大棚蔬菜地土壤水及地下水硝酸盐和亚硝酸盐污染的研究[J]. 延边大学学报(自然科学版), 2009, **35**(2): 156-159.
- [10] 施文永. 福建东山岛地下水资源管理与保护对策[J]. 水利技术监督, 2004, (5): 30-33.
- [11] 马荣欣, 张玉珍, 林振芳, 等. 东山县地下水质量评价及污染防治对策[J]. 海峡科学, 2008, (6): 29-32.
- [12] Jalali M. Nitrate pollution of groundwater in Toyserkan, western Iran [J]. *Environmental Earth Sciences*, 2011, **62**(5): 907-913.
- [13] 赵解春, 李玉中, Yamashita I, 等. 地下水硝酸盐污染来源的推断与溯源方法概述[J]. 中国农学通报, 2010, **26**(18): 374-378.
- [14] 王晓明, 王璐璐, 吴泊人, 等. 安徽淮北平原浅层地下水硝酸盐分布特征及污染来源分析[J]. 安徽地质, 2013, **23**(2): 142-145.
- [15] 马荣欣. 福建省沿海主要地区浅层地下水氮污染研究及典型区域地下水脆弱性评价[D]. 福州: 福建师范大学, 2009.
- [16] 马洪斌, 李晓欣, 胡春胜. 中国地下水硝态氮污染现状研究[J]. 土壤通报, 2012, **43**(6): 1532-1536.
- [17] 陈建平, 毛宏涛, 丁际豫, 等. 氮肥对地下水中“三氮”响应机理[J]. 辽宁工程技术大学学报(自然科学版), 2015, **34**(1): 118-123.
- [18] 林亚森. 东山县康美村地下水污染与村民癌症高发原因初探[J]. 海峡预防医学杂志, 2006, **12**(2): 31-32.
- [19] Gómez M A, Hontoria E, González-López J. Effect of dissolved oxygen concentration on nitrate removal from groundwater using a denitrifying submerged filter [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2002, **90**(3): 267-278.

CONTENTS

Estimation of PM _{2.5} Concentration over the Yangtze Delta Using Remote Sensing: Analysis of Spatial and Temporal Variations	XU Jian-hui, JIANG Hong	(3119)
Seasonal and Spatial Variations of Carbon Fractions in PM _{2.5} in Ningbo and the Estimation of Secondary Organic Carbon	DU Bo-han, HUANG Xiao-feng, HE Ling-yan, et al.	(3128)
Concentrations of Acidic Gases, Ammonia and Related Water-Soluble Ions in PM _{2.5} and Gas-Particle Partitioning in Qingdao	ZHOU Jia-jia, SHI Jin-hui, LI Li-ping, et al.	(3135)
Concentration and Particle Size Distribution of Microbiological Aerosol During Haze Days in Beijing	HU Ling-fei, ZHANG Ke, WANG Hong-bao, et al.	(3144)
Air Quality Characteristics in Beijing During Spring Festival in 2015	CHENG Nian-liang, CHEN Tian, ZHANG Da-wei, et al.	(3150)
Chemical Loss of Volatile Organic Compounds and Its Impact on the Formation of Ozone in Shanghai	WANG Hong-li	(3159)
Removal of Waste Gas Containing Mixed Chlorinated Hydrocarbons by the Biotrickling Filter	CHEN Dong-zhi, MIAO Xiao-ping, OUYANG Du-juan, et al.	(3168)
A Three Band Chlorophyll-a Concentration Estimation Model Based on GOCI Imagery	GUO Yu-long, LI Yun-mei, LI Yuan, et al.	(3175)
Temporal and Spatial Distribution Characteristics of Dissolved Organic Matter and Influencing Factors in Lake Chaohu	YE Lin-lin, WU Xiao-dong, LIU Bo, et al.	(3186)
Spectral Characteristic of Dissolved Organic Matter in Xiaohe River, Hebei	YU Min-da, ZHANG Hui, HE Xiao-song, et al.	(3194)
Spatial Variation of Ammonia-N, Nitrate-N and Nitrite-N in Groundwater of Dongshan Island	WU Hai-yan, FU Shi-feng, CAI Xiao-qiong, et al.	(3203)
Sources, Migration and Conversion of Dissolved Alkanes, Dissolved Fatty Acids in a Karst Underground River Water, in Chongqing Area	LIANG Zuo-bing, SUN Yu-chuan, WANG Zun-bo, et al.	(3212)
Influence of Sulfuric Acid to Karst Hydrochemical and $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ in the Upper and Middle Reaches of the Wujiang River	HUANG Qi-bo, QIN Xiao-qun, LIU Peng-yu, et al.	(3220)
Hydrochemical Characteristic and Reasoning Analysis in Siyi Town, Langzhong City	ZHANG Yan, WU Yong, YANG Jun, et al.	(3230)
Seasonal Variation on Nutrient Limitation for Phytoplankton Growth in a Coastal River-Reservoir System, Southeast China	CHEN Cong-cong, RAO La, HUANG Jin-liang, et al.	(3238)
Physiological Effect of <i>Vallisneria natans</i> Under Different Concentrations of Nitrogen, Phosphorus and Chloramphenicol	HU Zhen-zhen, CUI Yi-bin, LI Mei, et al.	(3248)
Effects of Algicidal Substance on <i>Phaeocystis globosa</i> and Its Fatty Acids by the Simulation Experiment	YANG Qiu-chan, ZHAO Ling, YIN Ping-he, et al.	(3255)
Agricultural Non-Point Source Pollutants Removal by Enhanced Riverbank Interception Facilities Under Different Operating Conditions	LI Huai-zheng, CHEN Ke-li, WEI Zhong, et al.	(3262)
Speciation Distribution and Risk Assessment of Heavy Metals in Typical Material Roof Dusts	LI Dun-zhu, GUAN Yun-tao, LIU An, et al.	(3269)
Formation of Disinfection By-Products During Chlor(am)ination of Danjiangkou Reservoir Water and Comparison of Disinfection Processes	ZHANG Min-sheng, XU Bin, ZHANG Tian-yang, et al.	(3278)
Effects of Interaction of Ozonation and Coagulation on Coagulation Results	LIU Hai-long, GUO Xue-feng, WANG Min-hui, et al.	(3285)
Effects of Anions on Bromate Formation During Ozonation of Bromide-Containing Water	WU Yue, WU Chun-de, LIU Li-gang, et al.	(3292)
XAS Analysis upon Dissolved Species of Orpiment in Anoxic Environment	WANG Ying, XU Li-ying, WANG Shao-feng, et al.	(3298)
AOX Pollution in Wastewater Treatment Process of Dyeing and Dyestuff Chemical Industries	SHEN Yang-yang, LIU Rui, XU Can-can, et al.	(3304)
Fate of ARB and ARGs During Wastewater Treatment Process of Spiramycin Production	QIN Cai-xia, TONG Juan, SHEN Pei-hong, et al.	(3311)
A Comparative Study on Two Membrane Bioreactors for the Treatment of Digested Piggy Wastewater	SHUI Yong, Kawagishi Tomoki, SONG Xiao-yan, et al.	(3319)
Analysis of Microbial Community in the Membrane Bio-Reactor (MBR) Rural Sewage Treatment System	KONG Xiao, CUI Bing-jian, JIN De-cai, et al.	(3329)
Start-up Characteristics of Four-zone Integrated Reactor for Nitrogen Removal in Winter and Analysis of Nitrobacteria Community	ZHANG Yan, SUN Feng-xia, XIE Hang-ji, et al.	(3339)
Achievement of Sulfate-Reducing Anaerobic Ammonium Oxidation Reactor Started with Nitrate-Reducing Anaerobic Ammonium Oxidation	LIU Zheng-chuan, YUAN Lin-jiang, ZHOU Guo-biao, et al.	(3345)
Effect of Increasing Organic Loading Rate on the Formation and Stabilization Process of Aerobic Granular Sludge	LIU Xiao-peng, WANG Jian-fang, QIAN Fei-yue, et al.	(3352)
Nitrogen Loss Through Different Ways in Cropland Under Conventional Fertilization: An <i>In-situ</i> Study of Summer Maize Season in the Middle and Lower Reaches of the Yangtze River	SANG Meng-meng, FAN Hui, JIANG Shan-shan, et al.	(3358)
Effects of Water and Nitrogenous Fertilizer Coupling on CH ₄ and N ₂ O Emission from Double-Season Rice Paddy Field	FU Zhi-qiang, LONG Pan, LIU Yi-yi, et al.	(3365)
Characteristics of N ₂ , N ₂ O, NO, CO ₂ and CH ₄ Emissions in Anaerobic Condition from Sandy Loam Paddy Soil	CAO Na, WANG Rui, LIAO Ting-ting, et al.	(3373)
Characteristics of Soil Respiration along Eroded Sloping Land with Different SOC Background on the Hilly Loess Plateau	CHEN Gai, XU Ming-xiang, ZHANG Ya-feng, et al.	(3383)
Effect of Biochar on Soil Greenhouse Gas Emissions in Semi-arid Region	GUO Yan-liang, WANG Dan-dan, ZHENG Ji-yong, et al.	(3393)
Characteristics and Coupling Relationship of Soil Carbon and Nitrogen Transformation During <i>In-situ</i> Mineralization Cultivation in Forestlands in the Mountain Area of Southern Ningxia	NI Yin-xia, HUANG Yi-mei, NIU Dan, et al.	(3401)
Nitrogen Fraction Distributions and Impacts on Soil Nitrogen Mineralization in Different Vegetation Restorations of Karst Rocky Desertification	HU Ning, MA Zhi-min, LAN Jia-cheng, et al.	(3411)
Distribution and Dynamics of Cropland Soil Organic Carbon in Jiangnan Plain: A Case Study of Qianjiang City	WANG Yu-zhu, XIAO He-ai, ZHOU Ping, et al.	(3422)
Impact of Land Utilization Pattern on Distributing Characters of Labile Organic Carbon in Soil Aggregates in Jinyun Mountain	LI Rui, JIANG Chang-sheng, HAO Qing-ju	(3429)
Magnetic Responses of Heavy Metals in Street Dust of Typical Mine-Based City, Northwest China	NIE Yan, WANG Xin, WANG Bo, et al.	(3438)
Distribution Characteristics of Heavy Metals in Environmental Samples Around Electroplating Factories and the Health Risk Assessment	GUO Peng-ran, LEI Yong-qian, ZHOU Qiao-li, et al.	(3447)
Homologues Levels and Distribution Pattern of Polychlorinated Biphenyls in Typical Capacitor Contaminated Soil	LIU Jie, LI Xiao-dong, ZHAO Zhong-hua, et al.	(3457)
Adsorption and Desorption Characteristics of Endosulfan in Purple Soil	ZHAO Yan, ZHENG Guo-can, ZHU Heng, et al.	(3464)
Influence of <i>Mirabilis jalapa</i> Linn. Growth on the Microbial Community and Petroleum Hydrocarbon Degradation in Petroleum Contaminated Saline-alkali Soil	JIAO Hai-hua, CUI Bing-jian, WU Shang-hua, et al.	(3471)
Al ³⁺ Absorption and Assimilation by Four Ectomycorrhizal Fungi	WANG Ming-xia, YUAN Ling, HUANG Jian-guo, et al.	(3479)
Contamination of Organophosphorus Pesticides Residue in Fresh Vegetables and Related Health Risk Assessment in Changchun, China	YU Rui, LIU Jing-shuang, WANG Qi-cun, et al.	(3486)
Community Structure and Succession of Methanogens in Beishenshu Landfill, Beijing	SONG Li-na, WANG Lei, XIA Meng-jing, et al.	(3493)
Fertility and Environmental Impacts of Urban Scattered Human Feces Used as Organic Granular Fertilizer for Leaf Vegetables	LÜ Wen-zhou, QIAO Yu-xiang, YU Ning, et al.	(3501)
Degradation of PCDD/Fs by the Mixture of V ₂ O ₅ -WO ₃ /TiO ₂ Catalyst and Activated Carbon	REN Yong, JI Sha-sha, YU Ming-feng, et al.	(3508)
Energy Conservation and Emissions Reduction Benefits Analysis for Battery Electric Buses Based on Travel Services	LIN Xiao-dan, TIAN Liang, LÜ Bin, et al.	(3515)
Definition and Control Indicators of Volatile Organic Compounds in China	JIANG Mei, ZOU Lan, LI Xiao-qian, et al.	(3522)
Influence of Dissimilatory Iron Reduction on the Speciation and Bioavailability of Heavy Metals in Soil	SI You-bin, WANG Juan	(3533)

《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 欧阳自远

副主编: 赵景柱 郝吉明 田 刚

编 委: (按姓氏笔画排序)

万国江 王华聪 王凯军 王绪绪 田 刚 田 静 史培军
朱永官 刘志培 刘 毅 汤鸿霄 孟 伟 周宗灿 林金明
欧阳自远 赵景柱 姜 林 郝郑平 郝吉明 聂永丰 黄 霞
黄 耀 鲍 强 潘 纲 潘 涛 魏复盛

环 境 科 学

(HUANJING KEXUE)

(月刊 1976年8月创刊)

2015年9月15日 第36卷 第9期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 36 No. 9 Sep. 15, 2015

主 管	中国科学院	Superintended	by	Chinese Academy of Sciences
主 办	中国科学院生态环境研究中心	Sponsored	by	Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences
协 办	(以参加先后为序) 北京市环境保护科学研究院 清华大学环境学院	Co-Sponsored	by	Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection School of Environment, Tsinghua University
主 编	欧阳自远	Editor-in -Chief		OUYANG Zi-yuan
编 辑	《环境科学》编辑委员会 北京市2871信箱(海淀区双清路 18号, 邮政编码:100085) 电话:010-62941102, 010-62849343 传真:010-62849343 E-mail: hjkx@rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn	Edited	by	The Editorial Board of Environmental Science (HUANJING KEXUE) P. O. Box 2871, Beijing 100085, China Tel:010-62941102, 010-62849343; Fax:010-62849343 E-mail: hjkx@rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn
出 版	科 学 出 版 社 北京东黄城根北街16号 邮政编码:100717	Published	by	Science Press 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷 装 订	北京北林印刷厂	Printed	by	Beijing Bei Lin Printing House
发 行	科 学 出 版 社 电话:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com	Distributed	by	Science Press Tel:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com
订 购 处	全国各地邮电局	Domestic		All Local Post Offices in China
国外总发行	中国国际图书贸易总公司 (北京399信箱)	Foreign		China International Book Trading Corporation (Guoji Shudian), P. O. Box 399, Beijing 100044, China

中国标准刊号: ISSN 0250-3301
CN 11-1895/X

国内邮发代号: 2-821

国内定价: 120.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行