

DOI: 10.5846/stxb201212111779

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. 生态学报, 2014, 34(15): 4372-4379.

Wang Q S, Gu Y, Sun D B. Spatial and seasonal variations of nitrate-N concentration in groundwater within Chao Lake watershed. Acta Ecologica Sinica, 2014, 34(15): 4372-4379.

巢湖流域地下水硝态氮含量空间分布和季节变化格局

王庆锁*, 顾颖, 孙东宝

(中国农业科学院农业环境与可持续发展研究所/农业部旱作节水农业重点开放实验室, 北京 100081)

摘要: 2009 年冬季、2010 年春季和夏季分别在巢湖流域采集了 253 个、249 个和 230 个水井的地下水样品, 分析了其硝态氮含量。结果表明, 巢湖流域的地下水硝酸盐污染比较严重, 冬季、春季和夏季的地下水硝态氮的超标率 (≥ 10 mg/L) 均超过 20%。巢湖北部区的地下水硝态氮含量高于南部地区。在巢湖北部区, 东北部江淮分水岭丘陵区的地下水硝态氮含量较低。在巢湖南部区, 地下水硝态氮含量具有从西部山区向东部平原逐渐升高的趋势。不同土地利用类型的地下水硝态氮含量排序是村庄 > 菜地 > 旱地 > 乡镇 > 水稻-油菜 (或小麦) 轮作田 > 果园 > 单季水稻田 > 养殖场, 传统水稻田 > 绿色水稻田。巢湖流域地下水硝态氮含量的季节变化总趋势为冬季 $\approx$ 春季 > 夏季, 主要与降水有关。不同土地利用类型的地下水硝态氮含量的季节变化格局不同, 其中地下水硝态氮含量呈现冬季 > 春季 > 夏季的土地类型为菜地、果园和水稻田, 春季 > 冬季 > 夏季的土地类型为旱地、乡镇、畜禽养殖场, 春季 > 夏季 > 冬季的土地类型为村庄, 这种季节变化格局主要与不同土地利用类型的施肥量、施肥时间的不同有关。

关键词: 硝态氮; 空间分布; 季节变化; 地下水; 巢湖流域

Spatial and seasonal variations of nitrate-N concentration in groundwater within Chao Lake watershed

WANG Qingsuo*, GU Ying, SUN Dongbao

Institute of Environment and Sustainable Development in Agriculture, CAAS/ Key Laboratory of Dryland Agriculture, MOA, Beijing 100081, China

Abstract: 253, 249 and 230 water samples from wells in Chao Lake watershed were respectively obtained in winter (2009), spring (2010) and summer (2010), and analysed for nitrate-N to discover its spatial and seasonal patterns. Groundwater nitrate contamination in Chao Lake watershed is severe, which more than 20% of shallow wells sampled in winter, spring and summer, respectively, show groundwater nitrate-N exceed 10 mg/L, the WHO limit for drinking water. The groundwater nitrate-N concentration in the north region of Chao Lake watershed is higher than that in the south region. The nitrate-N concentration in the south region decreases from western hill to eastern plain while that in the north region is lower in north-east part which is the divide between Yangtze River and Huai River. Rank of nitrate-N concentration in different land uses is village > vegetable land > dryland > town > rice-rape (or wheat) cropping field > orchard > single cropping rice field > livestock farm. In general, the nitrate-N concentration highlights significantly seasonal pattern with that being almost the same in winter and spring, and higher than that in summer from the whole Chao Lake watershed. However, seasonal patterns of nitrate-N concentration are different in different land use types, which the pattern of winter > spring > summer is found in vegetable land, orchard and rice field, that of spring > winter > summer in dry land, town and livestock farm, and that of spring > summer > winter in village, possibly due to different time and amount of fertilizer application.

基金项目: 国家科技支撑计划项目 (2007BAD87B01, 2012BAD09B01); 国家科技重大专项 (2008ZX07425)

收稿日期: 2012-12-11; **网络出版日期:** 2014-03-03

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: wangqingsuo@163.com

Key Words: nitrate nitrogen; spatial pattern; seasonal variation; groundwater; Chao Lake watershed

人类活动(化肥施用、畜禽养殖粪便、居民生活和工业污水)引起的地下水硝酸盐污染早已成为全球性的严重环境问题之一。饮用高硝态氮含量的地下水可危及人类健康安全^[1],如引发婴儿高铁血红蛋白症^[2-3]、消化道癌症和非霍金斯淋巴瘤^[4-5]、甲状腺失调^[6]。地下水硝态氮污染还会加剧以地下水补给的河流、湖泊等地表水的富营养化。

世界卫生组织(WHO)推荐的饮用水硝态氮含量的限定标准为 10 mg/L^[7]。根据 Singh 和 Sekhon^[8]、Spalding 和 Exner^[9]、Heathwaite 等^[10]的综述,全世界许多地方的地下水硝态氮含量早已超过 WHO 限定标准。许多国家和地区的地下水硝态氮含量还呈上升趋势,只有欧洲某些地方的地下水硝态氮含量自 20 世纪 90 年代开始已出现下降趋势^[11-12],这主要得益于欧共体国家综合执行了欧盟硝态氮法令、水框架法令和共同农业政策^[1]等。

地下水是巢湖流域农村居民的主要饮用水源,其地下水硝酸盐污染由来已久。在合肥市及其郊区,1/3 以上的居民水井的硝态氮含量超过 WHO 限定标准^[13-14]。2009 年冬季对巢湖流域不同土地利用类型的井水进行采样分析,其地下水硝态氮含量超标(WHO 限定标准)率的平均值为 22.92%,其中村庄井水的超标率高达 57.14%^[15]。本研究在上述工作的基础上,又对 2010 年春季和夏季的巢湖流域的地下水硝态氮含量进行了监测和分析,旨在进一步探讨巢湖流域地下水硝态氮含量的空间分布格局、季节变化规律及其影响因素,为巢湖流域乃至全国有效控制地下水硝态氮污染提供科学依据。

1 研究方法

1.1 研究区域概况

巢湖流域位于安徽省中部,属于亚热带湿润季风气候,多年平均温度 15—16℃,多年平均降水量 950—1250mm。农业以种植业为主,作物以水稻为主。水田主要种植单季稻或水稻-油菜(冬小麦)两季轮作,旱地主要种植棉花、大豆、花生、红薯等。

1.2 样品采集

2009 年 11 月 23 日至 12 月 5 日(冬季)、2010 年 4 月 10 日至 21 日(春季)和 2010 年 9 月 4 日至

13 日(夏季)分别对巢湖流域不同土地利用类型的井水进行了水样采集,采样井数量分别为 253 个、249 个和 230 个。样品采集与保存方法见顾颖等^[15]。

1.3 肥料施用情况调查

在地下水采样点附近,调查农作物的施肥情况,调查对象为当地的农民,调查内容为不同作物的肥料施用类型以及年施用量。巢湖流域施用的化肥主要有尿素、碳酸氢铵、磷酸二铵和复合肥,其纯氮折算系数分别为 46%、17%、18%和 13%。

1.4 样品分析测定

测定硝态氮的仪器为美国 LACHAT 公司 QuickChem 流动注射分析仪。采用的检测方法为 QuikChem12-107-04-1-1B,硝态氮检测范围为 0.025—20 mg/L,检测限为 0.005 mg/L。当检测的样品的硝态氮含量超过 20 mg/L,要对样品进行稀释,然后再测定。

1.5 地下水硝态氮污染评价标准

根据王庆锁等^[16]确定的地下水硝态氮污染评价标准,将地下水质量分为 6 个等级,即硝态氮含量 0—2.5 mg/L 为优质;2.5—5.0 mg/L 为良好;5.0—7.5 mg/L 为一般;7.5—10.0 mg/L 为达标,但已处于警戒状态;10—20mg/L 为超标,即超过世界卫生组织(WHO)规定的饮用水硝态氮含量小于 10 mg/L 的限定标准; ≥ 20 mg/L 为严重超标,即我国地下水质量标准(GB/T 14848-93)的限定值。

2 结果与分析

2.1 巢湖流域地下水硝态氮含量的空间分布格局

2.1.1 地下水硝态氮含量的总体状况

冬季(2009 年)、春季(2010 年)和夏季(2010 年)巢湖流域的地下水硝态氮含量的调查结果见图 1。冬季、春季和夏季巢湖流域的地下水硝态氮含量平均值分别为 7.13 mg/L、7.22mg/L 和 5.82mg/L,低于 WHO 饮用水硝态氮含量限定标准 10 mg/L。但不同采样点的地下水硝态氮含量差异较大,冬季、春季和夏季的变异系数分别高达 124.0%、133.7%和 131.4%。

整个流域有 20%以上的采样井的地下水硝态氮

含量超标和严重超标 (≥ 10 mg/L), 其中冬季、春季和夏季分别占采样井总数的 22.9%、23.3% 和 20.9%。冬季、春季和夏季地下水硝态氮含量严重超标 (≥ 20 mg/L) 的分别占采样井总数的 7.1%、7.6% 和 3.9%。

2.1.2 地下水硝态氮含量的地理分布格局

通过分析图 1 可以看出, 冬季、春季和夏季巢湖流域地下水硝态氮含量的空间分布格局极其相似, 并呈现出明显的地理分布特征。

巢湖北部地区的地下水硝态氮含量高于南部地区。巢湖北部区冬季、春季和夏季的地下水硝态氮含量的平均值分别为 9.74、10.17 mg/L 和 9.26 mg/L, 分别相当于巢湖南部地区的 1.8、2.2 倍和 2.4 倍。在巢湖北部地区, 1/2 以上的采样井地下水硝态氮含

量在冬季、春季和夏季均 ≥ 5 mg/L, 其中 1/3 以上的采样井的地下水硝态氮含量 ≥ 10 mg/L; 而在巢湖南部地区, 2/3 以上的采样井的地下水硝态氮含量在 3 个季节则均 < 5 mg/L, 其中不足 15% 的采样井的地下水硝态氮含量 ≥ 10 mg/L。巢湖流域地下水硝态氮含量的空间分布与作物种植模式和降水量大小有关。在巢湖北部区, 降水量较少 (降水量 950—1100 mm), 多采用水稻-油菜 (或小麦) 两季轮作的种植模式, 氮肥施用量较高 (表 1) 而淋洗程度较低, 因而地下水硝态氮含量较高; 而在巢湖南部地区, 降水量较多 (降水量 1100—1300 mm), 多采用单季水稻种植模式, 氮肥施用量较低而淋洗程度较高, 因而地下水硝态氮含量较低。

表 1 巢湖流域 3 种土地利用类型的化肥氮的施用量

Table 1 Fertilizer nitrogen applications for three land use types in the Chao Lake watershed

土地利用类型 Land use	样本/个 Samples	平均值/(kg/hm ²) Mean	最小值/(kg/hm ²) Minimum	最大值/(kg/hm ²) Maximum
旱地 Dryland	15	195.40	93.00	280.50
单季水稻田 Single cropping rice field	25	238.61	105.86	373.50
水稻-油菜(小麦)轮作田 Rice-rape(winter wheat) field	23	333.25	127.50	592.50

巢湖流域的地下水硝态氮含量空间格局与地形分布相吻合。在巢湖南部地区, 地下水硝态氮含量具有从西部山区向东部平原逐渐升高的趋势, 即金安<舒城<肥西<庐江。在巢湖北部区, 东北部江淮分水岭丘陵区的地下水硝态氮含量较低, 而其他地方则相对较高。

2.1.3 不同土地利用类型的地下水硝态氮含量

总的来看, 巢湖流域不同土地类型的地下水硝态氮含量排序是村庄>菜地>旱地>乡镇>水稻-油菜 (或小麦) 轮作田>果园>单季水稻田>养殖场 (图 2)。

村庄地下水的硝态氮污染最为严重。村庄地下水硝态氮含量平均值在冬季、春季和夏季均大于 15 mg/L, 其中春季和夏季还分别高于 20 mg/L。有 50% 以上的村庄地下水硝态氮含量超标或严重超标 (≥ 10 mg/L), 其中 20% 以上的严重超标 (≥ 20 mg/L)。

其次, 菜地的地下水硝酸盐污染较为严重。菜地地下水硝态氮含量平均值在冬季、春季和夏季分别接近或超过 10 mg/L (WHO 饮用水硝态氮含量限

定标准) 而小于 15 mg/L。有 40% 以上的菜地地下水硝态氮含量超标或严重超标 (≥ 10 mg/L), 但夏季无严重超标现象。

再次是旱地、乡镇、水稻-油菜 (或小麦) 轮作田。这 3 种土地类型的地下水硝态氮含量平均值在冬季、春季和夏季分别大于 5 mg/L 而小于 10 mg/L。有 15% 以上的采样井地下水硝态氮含量超标, 但夏季乡镇井的地下水硝态氮含量无严重超标现象。

果园地下水硝态氮含量比较低。果园地下水硝态氮含量平均值在冬季高于 5 mg/L 而在春季和夏季则分别低于 5 mg/L。在冬季和春季 25% 以上的采样井出现超标现象, 而夏季则无超标现象。单季水稻田的地下水硝态氮含量也比较低。单季水稻田地下水硝态氮含量平均值在 3 个季节都小于 5 mg/L。仅有 7.8% 以上的单季水稻田采样井的地下水硝态氮含量超标或严重超标 (≥ 10 mg/L), 其中 2% 以上的严重超标 (≥ 20 mg/L)。

畜禽 (奶牛和肉鸡) 养殖场的地下水硝态氮含量最低。3 个季节的养殖场地下水硝态氮含量平均值

最高仅为 2.97mg/L,没有出现超标和严重超标现象。

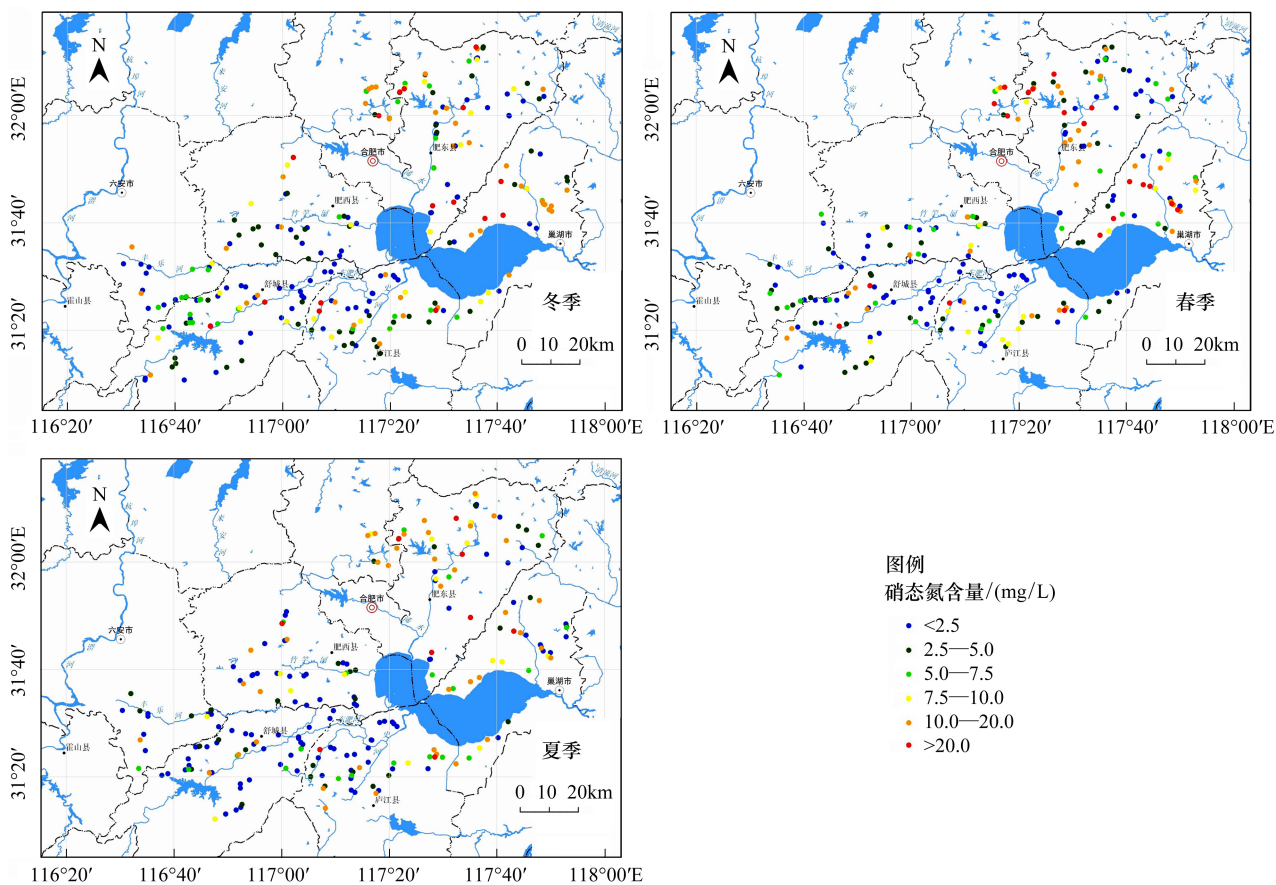


图 1 巢湖流域冬季、春季和夏季地下水的采样点及硝态氮($\text{NO}_3\text{-N}$)含量分布

Fig.1 Sampling sites and groundwater $\text{NO}_3\text{-N}$ concentrations in Chao Lake watershed in winter, spring and summer

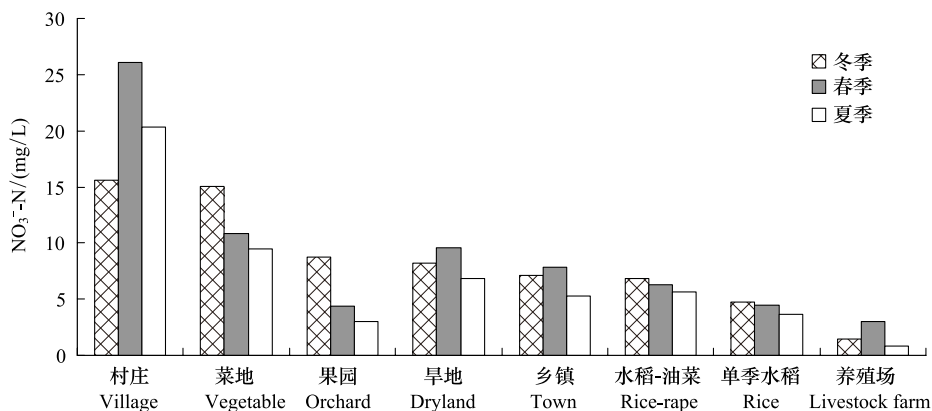


图 2 不同土地利用类型地下水硝态氮($\text{NO}_3\text{-N}$)含量的季节变化

Fig.2 Seasonal variation of $\text{NO}_3\text{-N}$ concentrations in groundwater under different land use types

2.1.4 绿色水稻田与传统水稻田的地下水硝态氮含量

巢湖流域绿色水稻田的地下水硝态氮含量比传统水稻田低(图 3)。例如,肥东县冬季、春季和夏季

绿色水稻田的地下水硝态氮含量平均值分别为 6.92、4.48mg/L 和 3.28mg/L,比传统水稻田分别低 6.21%、52.68%和 68.90%。绿色水稻田的地下水硝态氮超标率分别为 16.67%、16.67%和 0%,没有严重

超标现象;而传统水稻田的超标率分别为 31.40%、27.50%和 22.22%,严重超标率为 8.57%、5.00%和 0%。绿色水稻田的地下水硝态氮含量相对较低主

要与其化肥氮的施用量较少有关。肥东县绿色水稻田的年平均化肥氮施用量为 280.59 kg/hm²,比传统水稻田低 56.32 kg/hm²。

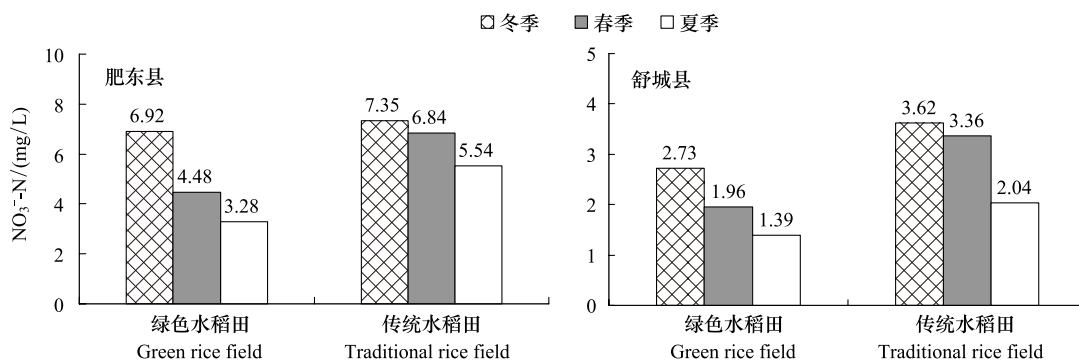


图3 绿色水稻产区与非绿色水稻产区地下水硝态氮(NO₃-N)含量的季节变化

Fig.3 Seasonal variation of NO₃-N concentrations in groundwater between green and non-green rice-producing area

2.2 巢湖流域地下水硝态氮含量的季节变化格局

2.2.1 地下水硝态氮含量的季节变化的总体趋势

总的来看,巢湖流域地下水硝态氮含量的季节变化格局为冬季≈春季>夏季(图4),这种季节变化格局主要受降水因素的影响。冬季和春季巢湖流域的降水量相对较少,地下水水位较深(冬季 2.40m,春季 1.64m),对地下水硝态氮含量的稀释程度低,因此冬季和春季的地下水硝态氮含量较高。而夏季巢湖流域降水量多且频繁,地下水水位较浅(夏季 1.36m),再加上地表水灌溉,降水和灌溉水很快渗入到地下水,并通过地下径流汇入地表水,从而强烈地稀释了地下水的硝态氮含量,导致夏季的地下水硝态氮含量最低。

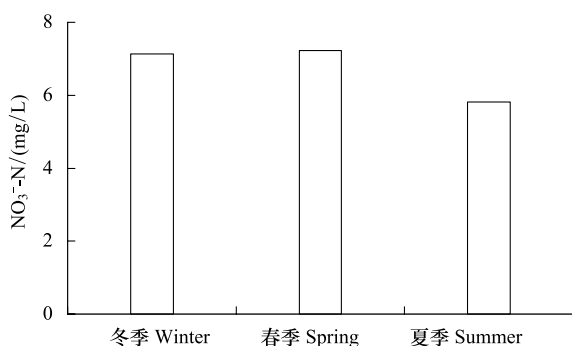


图4 巢湖流域地下水硝态氮(NO₃-N)含量季节变化

Fig. 4 Seasonal variation of NO₃-N concentrations in groundwater within the Chao Lake watershed

2.2.2 不同土地利用类型地下水硝态氮含量的季节变化格局

从巢湖流域不同土地利用类型的地下水硝态氮含量的季节变化格局来看,绝大多数的土地利用类型的地下水硝态氮含量是冬季和春季分别大于夏季(图2)。但不同土地利用类型的地下水硝态氮含量的季节变化格局不同,地下水硝态氮含量季节变化趋势呈现出冬季>春季>夏季的土地类型为菜地、水稻-油菜(或小麦)两季轮作田、单季水稻田和果园,其冬季地下水硝态氮含量分别为 15.03、6.81、4.74 mg/L 和 8.72mg/L,比春季分别提高 38.8%、8.8%、5.6%和 100.0%,比夏季分别提高 58.7%、19.7%、28.8%和 187.8%。

地下水硝态氮含量季节变化趋势呈现出春季>冬季>夏季的土地类型为旱地、乡镇、畜禽养殖场,其春季的地下水硝态氮含量分别为 9.60、7.83mg/L 和 2.97mg/L,比冬季分别提高 17.5%、9.8%和 98.0%,比夏季分别提高 40.6%、46.9%和 257.8%。

地下水硝态氮含量季节变化趋势呈现出春季>夏季>冬季的土地类型为村庄。村庄春季的地下水硝态氮含量为 26.05mg/L,比夏季和冬季分别提高了 28.3%和 67.0%。

3 结论与讨论

巢湖流域的地下水硝酸盐污染状况还是比较严重的。冬季、春季和夏季的地下水硝态氮含量平均值分别为 7.13、7.22mg/L 和 5.82mg/L,其超标率(≥10 mg/L)均超过 20%,并出现严重超标现象(≥20 mg/L)。不同采样点的地下水硝态氮含量差

异较大,其变异系数均高于 120%。巢湖流域地下水硝态氮含量分别与化肥氮的施用量和人口密度呈正相关^[15]。冬季、春季和夏季巢湖流域地下水硝态氮含量地理分布极其相似。巢湖北部地区的地下水硝态氮含量高于南部地区。在巢湖北部地区,东北部江淮分水岭丘陵区的地下水硝态氮含量较低。在巢湖南部地区,地下水硝态氮含量具有从西部山区向东部平原逐渐升高的趋势。巢湖流域地下水硝态氮含量的分异特征是由降水量、土地利用类型、作物种植模式、肥料的施用量、人口密度等空间异质性而造成的。

巢湖流域不同土地类型的地下水硝态氮含量排序是村庄>菜地>旱地>乡镇>水稻-油菜(或小麦)轮作田>果园>单季水稻田>养殖场。许多研究也发现高的地下水硝态氮含量出现在村庄^[15-18]和菜地^[15-16, 18-19]。村庄地下水高的硝态氮含量可能与庭院蔬菜种植而长期大量的施用肥料(化肥和有机肥等)以及厕所粪便长期堆积造成的硝态氮渗漏有关。菜地的地下水硝态氮含量普遍偏高也与肥料的过量施用有关。巢湖流域水稻田的化肥氮的施用量比旱地高(表 1),但其地下水的硝态氮含量反而较低,这可能与水稻田灌溉稀释和反硝化作用强烈有关。单季稻田的地下水硝态氮含量低于水稻-油菜(或小麦)轮作田,其原因一是单季水稻田的年施氮量低(表 1),二是冬季和春季调查时还没有施肥。巢湖流域绿色水稻田的地下水硝态氮含量比传统水稻田低,这归因于较少的肥料施用量。

巢湖流域地下水硝态氮含量的季节变化总趋势为冬季≈春季>夏季,这主要与降水量对地下水硝态氮的稀释有关。但不同土地利用类型的地下水硝态氮含量的季节变化格局不同,其中地下水硝态氮含量呈现冬季>春季>夏季的土地类型为菜地、水稻田和果园,春季>冬季>夏季的土地类型为旱地、乡镇、畜禽养殖场,春季>夏季>冬季的土地类型为村庄,这可能与不同土地利用类型的施肥量、施肥时间的不同有关。对于水稻-油菜(或冬小麦)轮作田而言,冬季调查时油菜刚移栽(或小麦已播种并出苗),已施完底肥。春季调查时刚追完肥。冬季和春季施入的氮肥被降水淋溶而进入地下水,从而引起地下水硝态氮含量的升高。由于油菜(或冬小麦)的底肥氮的施用量高于春季的追肥量,且冬季的降水量又比春

季少,对地下水硝态氮含量的稀释程度低,因此冬季的地下水硝态氮含量比春季高。夏季调查时水稻已施肥两个多月,水稻生长发育吸收了一定的肥料。又由于夏季降水量多,加上地表水灌溉,水稻长期处于淹水厌氧状态,地下水的硝态氮被强烈的稀释和反硝化而减少,引起夏季稻田的地下水硝态氮含量最低。对于单季水稻田而言,冬季采样时水稻刚收获完不久,春季采样时还没有种植水稻,即都没有进行施肥,故地下水中残留的硝态氮被降水进一步稀释,而导致冬季的地下水硝态氮含量高于春季。对菜地而言,调查的对象是保护地蔬菜,蔬菜在秋季种植,冬季上市;冬末又种植,春季和初夏上市;仲夏一般不种植,也无施肥。因此,夏季菜地的地下水硝态氮含量最低。冬季菜地地下水硝态氮含量高于春季,可能与冬季菜地的施肥量高、降水量较少有关。对于村庄而言,庭院种植的是露地蔬菜,春季、夏季和秋季都进行种植而施肥,而冬季为收获期不施肥,因此春季和夏季的硝态氮含量高于冬季,又因春季降水量比夏季少,因此春季的地下水硝态氮含量最高。

总的来看,关于地下水硝态氮含量的季节变化格局的研究较少,研究的结果也不尽相同。多数研究在 1 年内只进行 2—4 次的地下水硝态氮检测,缺乏长期的、连续的观测数据(如每月 1 次或半月 1 次的监测数据),获得的地下水硝态氮的季节变化格局多是定性的。在湿润气候区,降水量高(尤其是雨季),地下水水位比较浅,降水易于下渗到地下水,并对土壤中的硝态氮进行淋溶。Holz^[20]发现澳大利亚塔斯马尼亚集约化牧场的地下水硝态氮含量随着冬季第一次降水而出现峰值。随着雨季降水的持续(或者大的降雨),下渗水中的 NO_3^- -N 含量降低,对地下水的硝态氮产生稀释作用,引起雨季地下水硝态氮含量的降低,且小于枯水季节^[21-22],本研究也获得了同样的结论。然而相反的研究结果出现在四川中部丘陵菜地^[23]和云南抚仙湖水稻-大蒜(小麦)田^[24],这可能与雨季的施肥次数多、施肥量高有关。在半湿润气候区,降水少,浅层地下水埋深比较深,只有雨季的降水(1 次的大雨或数次叠加的降水)才能下渗到地下水,同时对土壤中的硝态氮进行淋溶。由于降水的下渗水的量较少而硝态氮含量较高,从而引起雨季(7—9 月)或雨季过后(10—12 月)的地

下水硝态氮含量高于雨季前期^[25-29]。雨季前期地下水低的硝态氮含量还可能与因抽水(灌溉和饮用)而引起的地下水水位下降,以及地下水在水平方向的混合有关。山东寿光蔬菜种植区的地下水硝态氮含量年内(从年初到年末)呈明显的上升趋势^[26-27],这可能由降水、灌水和施肥因素共同引起。在干旱的内蒙古河套平原,灌水定额高,地下水水位很浅,每次灌水后往往引起地下水硝态氮含量的降低^[30],且3月份的浅层地下水的硝态氮含量显著高于5月、7月和9月^[31]。由于影响地下水硝态氮的因素很多,特别是不同地区的降水量不同、不同作物的施肥时间和施肥量的不同、地下水的埋深不同而造成的下渗水流到达地下水的滞后时间不同,因而引起地下水硝态氮含量的季节变化格局不同,有单峰型^[28-29,32]、上升型^[27,32]、下降型、稳定型和易变型^[32],尤其是硝态氮含量的峰值和谷值出现的时间具有很高的不确定性。

References:

- [1] World Health Organization. Health Hazards from Nitrates in Drinking Water. Copenhagen: WHO, 1985.
- [2] Addiscott T M, Whitmore A P, Powlson D S. Farming, Fertilizers and the Nitrate Problem. Wallingford: CAB International, 1991.
- [3] Follett R F, Keeney D R, Cruse R M. Managing Nitrogen for Groundwater Quality and Farm Profitability. Madison: Soil Science Society of America, 1991.
- [4] Gulis G, Czompolyova M, Cerhan J R. An ecologic study of nitrate in municipal drinking water and cancer incidence in Trnava District, Slovakia. *Environmental Research*, 2002, 88 (3): 182-187.
- [5] Camargo J A, Alonso Á. Ecological and toxicological effects of inorganic nitrogen pollution in aquatic ecosystems: a global assessment. *Environment International*, 2006, 32(6): 831-849.
- [6] Gatseva P D, Argirova M D. High-nitrate levels in drinking water may be a risk factor for thyroid dysfunction in children and pregnant women living in rural Bulgarian areas. *International Journal of Hygiene and Environmental Health*, 2008, 211(5/6): 555-559.
- [7] World Health Organization. Guidelines for Drinking Water Quality. Vol. 2. Health Criteria and Other Supporting Information. Geneva: WHO, 1984.
- [8] Singh B, Sekhon G S. Nitrate pollution of groundwater from farm use of nitrogen fertilizers: A review. *Agriculture and Environment*, 1979, 4(3): 207-225.
- [9] Spalding R F, Exner M E. Occurrence of nitrate in Groundwater: A review. *Journal of Environmental Quality*, 1993, 22 (3): 392-402.
- [10] Heathwaite A L, Johnes P J, Peters N E. Trends in nutrients. *Hydrological Processes*, 1996, 10(2): 263-293.
- [11] Rozemeijer J C, Broers H P, Van Geer F C, Bierkens M F P. Weather-induced temporal variations in nitrate concentrations in shallow groundwater. *Journal of Hydrology*, 2009, 378 (1/2): 119-127.
- [12] Wang Q S, Sun D B, Hao W P, Li Y Z, Mei X R, Zhang Y Q. Human activities and nitrogen in waters. *Acta Ecologica Sinica*, 2012, 32(4): 174-179.
- [13] Chu Y. Studies on nitrate contamination and its prevention countermeasures in groundwater of Hefei. *Journal of Anhui Agricultural University*, 2001, 28(1): 98-101.
- [14] Chen G, Luo J H. Study on the nitrate pollution in Nanfeihe River Basin of Hefei. *Journal of Hebei Agricultural Sciences*, 2009, 13 (3): 90-91.
- [15] Gu Y, Sun D B, Wang Q S. Studies on groundwater nitrate nitrogen distribution and its affecting factors in Chao Lake watershed. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 2011, 13(1): 68-74.
- [16] Wang Q S, Sun D B, Hao W P, Gu Y, Li Y Z, Mei X R, Zhang Y Q. Nitrate concentration distribution in groundwater of the Miyun Reservoir Watershed. *Acta Pedologica Sinica*, 2011, 48 (1): 141-150.
- [17] Singh B, Sekhon G S. Nitrate pollution of groundwater from nitrogen fertilizers and animal wastes in the Punjab, India. *Agriculture and Environment*, 1976, 3(1): 57-67.
- [18] Zhang W L, Tian Z X, Zhang N, Li X Q. Investigation of nitrate pollution in ground water due to nitrogen fertilization in agriculture in North China. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 1995, 1 (2): 80-87.
- [19] Liu H B, Li Z H, Zhang Y G, Zhang W L, Lin B. Nitrate contamination of groundwater and its affecting factors in rural areas of Beijing plain. *Acta Pedologica Sinica*, 2006, 43(3): 405-413.
- [20] Holz G K. Seasonal variation in groundwater levels and quality under intensively drained and grazed pastures in the Montagu catchment, NW Tasmania. *Agricultural Water Management*, 2009, 96(2): 255-266.
- [21] Ye C, He X Y, Xiong G G, Wu S Z, Li H B, Yu X C, He S Z. Study on moveable regularity of shallow subsurface water in low hilly red soil region of Northeast Jiangxi. *Acta Agriculturae Jiangxi*, 2001, 13(4): 12-18.
- [22] Zhao X J, Zhao X R, Wang C T. Monitoring NO_3^- -N variation of groundwater in agriculture region of Chengdu Plain. *Acta Pedologica Sinica*, 2004, 41(1): 56-60.
- [23] Chen K L, Zhu X D, Zhu B, Wang X H, Cai B C. Temporal and spatial variation of NO_3^- -N pollution in groundwater in small watershed of central Sichuan Basin. *Journal of Agro-Environment*

- Science, 2006, 25(4): 1060-1064.
- [24] Li Z Z, Gao H Y, Zhang Q, Xu L G. Nitrate pollution of groundwater and the affecting factors in typical farmlands of Fuxianhu Lake catchment. *Journal of Agro-Environment Science*, 2008, 27(1): 286-290.
- [25] Dong W H, Lin X Y. Analysis on the influence factors of the nitrogen pollution in shallow groundwater: A case in the north high plain of Songhua River in Songnen Basin. *Journal of Jilin University: Earth Science Edition*, 2004, 34(2): 231-235.
- [26] Dong Z H, Li J, Sun L M. Nitrate contamination in the groundwater of intensive vegetable cultivation areas in Shouguang City, Shandong Province, China. *Journal of Agro-Environment Science*, 2005, 24(6): 1139-1144.
- [27] Song X Z, Zhao C X, Li J, Wang X L, Wu G, Jaleel C A. Dynamic variation of nitrate-nitrogen content in groundwater under two different agricultural cropping systems. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28(11): 5513-5520.
- [28] Yang J M, Liu J H, Yu X B, Yang W B, Zhou M P. Variation of nitrogen resource in groundwater and river water in Changchun Region. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2010, 24(6): 255-257, 262-262.
- [29] Xu Z W, Zhang X Y, Sun X M, Yuan G F, Wang S Z, Liu W H. Assessment of shallow groundwater nitrate concentrations in typical terrestrial ecosystems of Chinese Ecosystem Research Network (CERN) During 2004—2009. *Environmental Science*, 2011, 32(10): 2827-2833.
- [30] Feng Z Z, Wang X K, Feng Z W. NO_3^- -N dynamics in a spring wheat and radish multiple-crop system in the Hetao Irrigation District. *Environmental Science*, 2006, 27(6): 1223-1228.
- [31] Feng Z Z, Wang X K, Feng Z W. N pollution of groundwater in Hetao Irrigation District. *Rural Eco-Environment*, 2005, 21(4): 74-76.
- [32] Thorburn P J, Biggs J S, Weier K L, Keating B A. Nitrate in groundwaters of intensive agricultural areas in coastal Northeastern Australia. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2003, 94(1): 49-58.
- [15] 顾颖, 孙东宝, 王庆锁. 巢湖流域地下水硝态氮的分布及其影响因素. *中国农业科技导报*, 2011, 13(1): 68-74.
- [16] 王庆锁, 孙东宝, 郝卫平, 顾颖, 李玉中, 梅旭荣, 张燕卿. 密云水库流域地下水硝态氮的分布及其影响因素. *土壤学报*, 2011, 48(1): 141-150.
- [18] 张维理, 田哲旭, 张宁, 李晓齐. 我国北方农用氮肥造成地下水硝酸盐污染的调查. *植物营养与肥料学报*, 1995, 1(2): 80-87.
- [19] 刘宏斌, 李志宏, 张云贵, 张维理, 林葆. 北京平原农区地下水硝态氮污染状况及其影响因素研究. *土壤学报*, 2006, 43(3): 405-413.
- [21] 叶川, 贺湘逸, 熊国根, 吴水助, 李慧斌, 余喜初, 贺思哲. 赣东北低丘红壤坡地浅层地下水活动规律研究. *江西农业学报*, 2001, 13(4): 12-18.
- [22] 赵燮京, 赵小蓉, 王昌桃. 成都平原农区地下水中 NO_3^- -N 含量变化规律研究. *土壤学报*, 2004, 41(1): 56-60.
- [23] 陈克亮, 朱晓东, 朱波, 王向华, 蔡邦成. 川中小流域地下水硝态氮的时空变化特征. *农业环境科学学报*, 2006, 25(4): 1060-1064.
- [24] 李正兆, 高海鹰, 张奇, 徐力刚. 抚仙湖流域典型农田区地下水硝态氮污染及其影响因素. *农业环境科学学报*, 2008, 27(1): 286-290.
- [25] 董维红, 林学钰. 浅层地下水氮污染的影响因素分析——以松嫩盆地松花江北部高平原为例. *吉林大学学报: 地球科学版*, 2004, 34(2): 231-235.
- [26] 董章杭, 李季, 孙丽梅. 集约化蔬菜种植区化肥施用对地下水硝酸盐污染影响的研究——以“中国蔬菜之乡”山东省寿光市为例. *农业环境科学学报*, 2005, 24(6): 1139-1144.
- [27] 宋效宗, 赵长星, 李季, 王小兰, 吴钢, Jaleel C A. 两种种植体系下地下水硝态氮含量变化. *生态学报*, 2008, 28(11): 5513-5520.
- [28] 杨靖民, 刘金华, 于晓斌, 杨卫斌, 周米平. 长春地区河水和地下水中氮含量的时空变化. *水土保持学报*, 2010, 24(6): 255-257, 262-262.
- [29] 徐志伟, 张心昱, 孙晓敏, 袁国富, 王升忠, 柳文华. 2004-2009 年我国典型陆地生态系统地下水硝态氮评价. *环境科学*, 2011, 32(10): 2827-2833.
- [30] 冯兆忠, 王效科, 冯宗伟. 河套灌区春小麦-萝卜复种模式下土壤 NO_3^- -N 动态. *环境科学*, 2006, 27(6): 1223-1228.
- [31] 冯兆忠, 王效科, 冯宗伟. 河套灌区地下水氮污染状况. *农村生态环境*, 2005, 21(4): 74-76.
- 参考文献:**
- [13] 储茵. 合肥市地下水硝酸盐氮污染程度及其防治对策的研究. *安徽农业大学学报*, 2001, 28(1): 98-101.
- [14] 陈干, 罗继红. 合肥市滨湖新区硝酸盐污染研究. *河北农业科学*, 2009, 13(3): 90-91.