

淮北平原地下水三氮浓度分布规律及其影响因素分析

王伟宁¹, 许光泉¹, 何晓文²

(1. 安徽理工大学地球与环境学院, 安徽 淮南 232001; 2. 淮南联合大学化工系, 安徽 淮南 232001)

摘要 对淮北平原浅层地下水 103 个样品进行三氮及其他相关指标测定分析, 揭示该区三氮的空间分布规律、来源及形成机理, 并对其影响因素进行分析。结果表明 淮北平原浅层地下水三氮浓度逐年增大, 并与其水位埋深呈负相关关系, 丰水期的三氮浓度明显大于枯水期。农业含氮肥料的过量使用和流失是导致该区三氮浓度增高的主要原因。此外, 三氮浓度还受到包气带的厚度大小的影响, pH 值的变化范围、溶解氧浓度的高低也影响着三氮的转化方向和速度, 高浓度的 Fe^{2+} 是导致局部 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 严重超标的重要因素。

关键词 三氮; 分布规律; 形成机理; 影响因素

中图分类号: X820.3 文献标识码: A 文章编号: 1004-693X(2010)02-0045-04

Distribution and analysis of factors influencing three nitrogen compounds in groundwater of Huaibei Plain

WANG Wei-ning¹, XU Guang-quan¹, HE Xiao-wen²

(1. School of Earth Sciences and Environment, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, China; 2. School of Chemical Engineering, Huainan Union University, Huainan 232001, China)

Abstract: Based on the measurements of three nitrogen compounds and other related indicators from 103 shallow groundwater samples taken in the area of the Huaibei Plain, the spatial distribution of the three nitrogen compounds, the source, and the formation mechanisms were revealed and their factors were analyzed. The results showed that the concentrations of the three nitrogen compounds in the shallow groundwater of the Huaibei Plain had increased year by year, and were inversely proportional to the depth of the water table. The concentrations of the three nitrogen compounds in the wet season were significantly greater than those in the dry season. Excessive use and washing away of agricultural nitrogen fertilizer was the main reason for higher nitrogen content in this area. In addition, the concentrations of the three nitrogen compounds were influenced by the unsaturated zone thickness, and the transformation direction and speed of the three nitrogen compounds were affected by the range of pH values and the level of dissolved oxygen. The high concentration of Fe^{2+} was one of the most important factors in the exceedence of the $\text{NO}_2^- - \text{N}$ standard locally.

Key words: three nitrogen compounds; distribution law; formation mechanism; influencing factors

氮污染目前已经成为我国地下水污染的重大问题之一。近年来, 随着城市生活区含氮废水的大量排放以及农业氮肥的过量使用, 地下水中的氮化合物, 主要包括离子态的氨氮($\text{NH}_4^+ - \text{N}$)、亚硝酸盐氮($\text{NO}_2^- - \text{N}$)、硝酸盐氮($\text{NO}_3^- - \text{N}$), 即“三氮”, 其浓度在不同程度上呈现出上升的趋势^[1]。因此, 有必要对地下水环境中氮的分布特征、形成转化机理和影响因素进行研究和分析, 为地下水中氮污染的控制和

治理提供科学依据。

1 内容与方法

1.1 研究区概况

淮北平原地处安徽省北部, 地势开阔平坦, 由西北向东南缓倾斜, 坡降 1/8 000, 地面标高约在 35 ~ 40 m 之间。浅层为第四系所覆盖, 厚度从几十米到二百多米, 主要为冲积物、洪积物, 富水性较好, 潜水

水位埋深在 1.7~4.2 m 之间, 防污性较差^[2]。淮北平原地区水系复杂, 支流多, 受西北向东南倾斜地势的影响, 大量的含氮废水和生活污水易沿支流或河道在地下水中汇总, 尤其在地下水径流滞缓、补给排泄不畅的地段, 更易造成较高浓度的氮污染。同时, 淮北平原属典型的季风气候区, 气候特点为夏热多雨, 秋季少雨, 冷暖和旱涝的转变很突出。因此浅层地下水的氮污染程度也受降水、蒸发等季节因素的影响。近年来, 随着工农业的迅猛发展以及农药化肥的大量使用, 淮北平原地区沿河岸及部分城区浅层地下水水质遭受到严重的三氮污染, 甚至部分区域中、深层地下水水质也受到了不同程度的影响。因此, 如何合理开发、利用和保护地下水资源, 防治氮污染, 对淮北平原地下水可持续利用具有十分重要的意义^[3]。

1.2 水样采集

本次共采集了 103 个水样, 采样点集中分布在淮北平原的阜阳、亳州、淮南、淮北、蚌埠和宿州等市, 见图 1。采样时间为 2008 年 4~6、9~11 月。采集深度为 0~60 m 的浅层地下水水样。

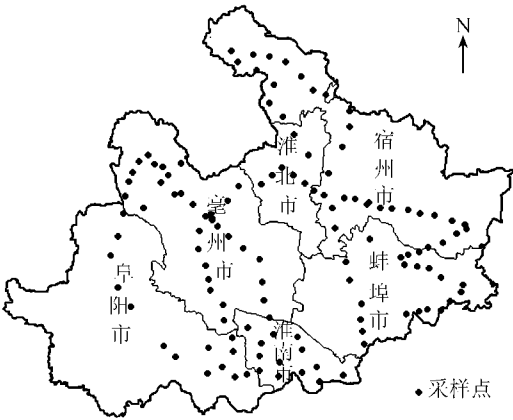


图 1 淮北平原采样点分布

1.3 检测项目

$\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$, pH 值, DO(溶解氧), Fe^{2+} 。

1.4 检测方法

$\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 采用紫外分光光度法测定; $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 采用 DX-120 离子色谱仪测定, Fe^{2+} 采用 TAS-986 原子吸收仪测定, pH 值、DO 通过快速测定仪现场测定。

2 结果与分析

2.1 检测结果及分布区域

本次试验所有样品均按照 GB/T 14848—1993《地下水质量标准》Ⅲ类水标准进行评价, $\rho(\text{NH}_4^+\text{-N}) \leq 0.2 \text{ mg/L}$, $\rho(\text{NO}_3^-\text{-N}) \leq 20 \text{ mg/L}$, $\rho(\text{NO}_2^-\text{-N}) \leq$

0.02 mg/L, 淮北平原 2008 年三氮检测结果见表 1。

表 1 淮北平原 2008 年三氮检测结果

项目	最小值/ ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	最大值/ ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	平均值/ ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	检出 率/%	超标 率/%	变异 系数/%
$\rho(\text{NH}_4^+\text{-N})$	0.08	2.30	0.43	100	54.55	60.47
$\rho(\text{NO}_3^-\text{-N})$	1.23	38.87	19.84	100	76.82	38.21
$\rho(\text{NO}_2^-\text{-N})$	0.00	0.39	0.04	34.55	19.09	200.00

地下水中“三氮”浓度以 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 浓度最高, 其次为 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 。103 个样品中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 全部检出, 超标率为 54.55%, 其最高质量浓度为 2.30 mg/L, 是国标地下水Ⅲ类水的 11.5 倍。 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 超标率高达 76.82%, 其平均质量浓度为 19.84 mg/L, 已接近地下水限值 20 mg/L, 总体浓度偏高。 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 检出率为 34.55%, 超标率为 19.09%, 并有增大的趋势。其最高质量浓度达 0.39 mg/L, 由于其具有强致癌性, 所以危害最大。

变异系数差异性大反映了“三氮”在平面上分布的不均匀性, 其浓度具有明显的地域性差异。 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 变异系数最小, 浓度相对集中, 主要分布在蚌埠、宿州两地。 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 变异系数高达 200%, 其浓度分布具有明显的分散性, $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 在淮北平原 6 市均有检出。 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 变异系数介于 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 、 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 之间, 高浓度的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 主要集中在淮北平原的淮南、亳州两地。

2.2 “三氮”的空间分布规律

2.2.1 “三氮”浓度随深度的变化规律

根据样品浓度均值, 对 103 个样品按采样深度的不同进行划分: 0~10 m(23 个)、10~20 m(20 个)、20~30 m(21 个)、30~40 m(12 个)、40~50 m(17 个)、50~60 m(10 个), 并绘制 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 质量浓度随深度的变化曲线。图 2 反映了淮北平原三氮浓度随深度的变化规律, 由于 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 为两者中间产物且检出率低, 仅为 34.55%, 故不讨论。随着深度的增加, 地表含氮污水在入渗地下水的过程中, 受到土壤硝化细菌与反硝化细菌的硝化和反硝化作用以及土壤颗粒的吸附滞留作用, 两者的污染程度由上到下

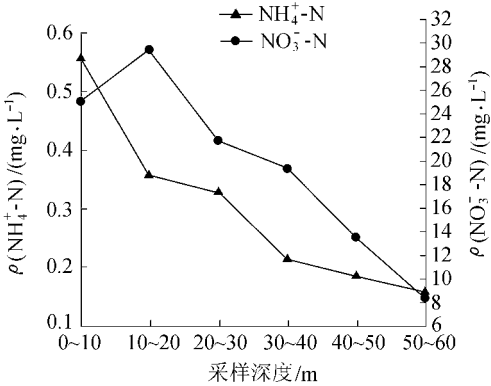


图 2 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 质量浓度随深度变化曲线

呈现递减趋势。高浓度 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 主要集中在小于 10 m 的浅层地下水,由于土壤硝化细菌的硝化作用, $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 则多在深度小于 20 m 的浅层水中富集。

2.2.2 “三氮”浓度随时间的变化规律

查阅 2006、2007 年的“三氮”监测数据,与 2008 年“三氮”数据相比较后,统一取采样深度 10 ~ 20 m 的样品(2006 年丰水期 17 个、枯水期 15 个,2007 年丰水期 14 个、枯水期 10 个,2008 年丰水期 10 个、枯水期 10 个),并绘制样品“三氮”质量浓度均值随时间的变化曲线,见图 3。由图 3 可见, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 在浅层地下水中的浓度呈逐年上升趋势。由于淮北平原的降水量呈现夏多冬少的特点,导致地下水中两者的浓度在丰水期明显高于枯水期。表明在大气降水溶滤作用下,“三氮”伴随降水下渗并日趋严重污染地下水。

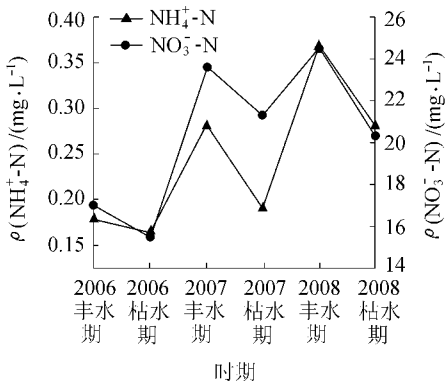


图 3 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 质量浓度随时间变化曲线

2.3 “三氮”的来源及形成机理

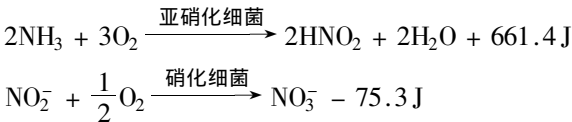
2.3.1 “三氮”的来源

20 世纪 80 年代前,淮河流域地区浅层地下水污染较轻,其“三氮”质量浓度本底值: $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 为 0.066 mg/L, $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 为 1.31 mg/L, $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 为 0.012 mg/L。但随着淮北平原区域污染源日益增多,污染程度随之加大,导致“三氮”浓度呈逐年上升的趋势。该区污染源主要包括工业的“三废”、化肥、农药的过量使用、生活污水、污水灌溉等。其中,农药、农业含氮肥料的过量使用和流失是导致地下水“三氮”浓度偏高的主要因素。

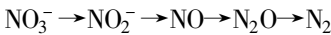
2.3.2 “三氮”的形成机理

“三氮”之间通过硝化作用和反硝化作用相互转化。硝化作用分为两个阶段进行^[41]: ①亚硝化作用,氮被亚硝化细菌氧化成亚硝酸; ②硝化作用,亚硝酸经硝化作用,氧化为硝酸。

农业灌溉过程中, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 经硝化作用转变为硝态氮 $\text{NO}_3^-\text{-N}$,随水下渗进入含水层,成为地下水中“三氮”的最主要的直接污染物。化学反应式如下:



反硝化作用指硝酸在通气不良情况下借微生物作用的还原过程。由于还原的程度不同,可生成不同的还原态产物,如亚硝酸、次亚硝酸、一氧化氮,以及分子态氮等。转化途径为:



此外, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 还是地表水中的主要污染物。当随大气降水、地表径流下渗进入土壤以后, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 被带电的土壤颗粒强烈吸附,在适宜的条件下,被土壤硝化细菌硝化生成 $\text{NO}_3^-\text{-N}$,进入地下水中。因此,地表水的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 经硝化作用后,以 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 的形式进入地下水,硝化作用不完整时以 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 的形式存在于水中,当 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度超过土壤的吸附能力,在未能良好硝化的条件下, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 随地表水下渗,直接进入地下水中,对地下水产生污染。

3 “三氮”的影响因素

除了工农业污水、生活污水的不合理排放对地下水氮污染造成影响,还有其他因素制约着“三氮”的浓度及其相互转化,分述如下。

3.1 包气带厚度

包气带位于地面以下潜水面以上,是大气降水和地表水同地下水发生联系并进行水分交换的地带。进入包气带环境的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 首先被迅速吸附并保存在土壤中,然后才进行硝化过程。因此,包气带的厚度越大对 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 污染地下水的阻碍作用也越大。但由于淮北平原地区降水量丰富,造成包气带与大气之间强烈的水分交换,尤其在包气带厚度较薄的地区,这种交换作用更加明显。导致残留在农田土壤里的氮肥更易随降水径流透过包气带,渗入地下污染地下水^[5]。

淮北平原南部包气带厚度较薄,一般小于 20 m。有些地方基岩裸露,氮污染物没有吸附并进行硝化作用的机会,就直接进入岩溶含水层,这使 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 更易进入地下水中,导致某些区域地下水 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 检出量较高,如淮南、亳州两地,其质量浓度最高可达 2.30 mg/L。北部包气带厚度相对较大,为 30 ~ 60 m,颗粒较粗,为中粗砂、砾石等,一般表层多为粉砂并带有黏土透镜体,因而含氮污水在下渗过程中有充分的会被吸附,并在包气带中进行硝化作用。因而北部地下水中有较高 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 检出,而 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 相应较低。安徽淮北平原北部的宿州市地下水中 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 及 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度即呈现此变化规律。

3.2 pH 值

硝化反应最佳的 pH 值范围为 6.4~7.9 ,pH 值的降低和升高都会对硝化细菌的活性造成不同程度的影响 ,进而破坏硝化反应的平衡性。其中 ,碱性水会减缓硝化作用的进行^[6]。

淮北平原浅层地下水 pH 平均值为 7.82 ,属于中性偏碱性水。其中 43.19% 的水样 pH 值已高于硝化作用的最佳条件。强碱性条件会抑制硝化细菌的硝化反应速度 ,使得 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度整体偏高。取 2006~2008 年的 4~6 月的“三氮”监测数据 ,选择同一深度 10~20 m 的样品共 51 个 ,并按 pH 值的范围不同进行划分 :6.4~6.7(11 个) 6.8~7.1(8 个) 7.2~7.5(6 个) 7.6~7.9(6 个) 8~8.3(7 个) >8.4(13 个)绘制“三氮”质量浓度均值随 pH 值变化的曲线(图 4)。当水样 pH 值处在硝化反应最佳 pH 值范围之内时 ,“三氮”浓度呈正相关关系。而在 pH 值大于 7.9 的范围内 , $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度明显增大 ,但 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 、 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 浓度减少或变化不明显 ,表明 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的硝化反应在碱性条件下受到抑制。在宿州市砀山县 ,其地下水 pH 值高达 8.97 ,使得其硝化过程基本停滞 ,导致该地区地下水中“三氮”主要以 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 形式存在 ,其他两种形式的氮相对较少。

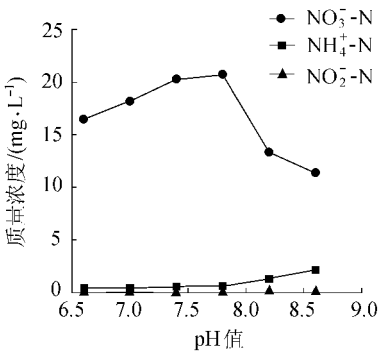


图 4 “三氮”质量浓度均值随 pH 值变化曲线

3.3 DO 浓度

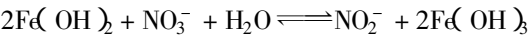
地下水中 DO 浓度的高低也影响着“三氮”的转化方向。高浓度的 DO 加速了好氧的亚硝化细菌或硝化细菌将 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 转化为 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 的过程 ;而 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 在低浓度 DO 的条件下更易被厌氧的反硝化细菌所还原 ,最终以 N_2 的形式从地下水中逸出^[7]。

淮北平原地下水 $\rho(\text{DO})$ 值的范围为 4.1~20.5 mg/L。通过对 2006~2008 年的 4~6 月份同一深度(10~20 m) 共 87 个浅层地下水样本“三氮”浓度随 DO 变化的统计分析可知 ,其 DO 浓度的高低分布与“三氮”浓度分布存在一定的相关性。其中 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 浓度受 DO 变化影响最明显 ,呈负相关性

($r = -0.654$, $p < 0.01$) ,而 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 与 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 在地下水中的浓度则随着 DO 质量浓度的增大缓慢增加。其中在 DO 质量浓度高达 20.5 mg/L 的蚌埠市五河县 ,其地下水中 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 的浓度也相应地出现峰值 ,其中 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 质量浓度最高可达 38.87 mg/L ,而在无氧或缺氧的亳州、淮南等地区 ($\alpha(\text{DO}) < 5$ mg/L) 地下水中的氮多以 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 形式存在 , $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 浓度均低于地下水Ⅲ类水限值 ,而 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 的检出率也极低(均低于 5%)。

3.4 Fe^{2+} 浓度

Fe^{2+} 具有较强的还原性 , NO_3^- 具有较强的氧化性 ,在中性偏碱的水中会发生氧化还原反应^[8] ,其反应式为 :



淮北平原地区 Fe^{2+} 普遍超标 ,质量浓度变化范围为 0.12~2.84 mg/L。由于降水量和采样深度等自然因素对 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 的富集影响极小 ,故采用 2008 年的 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 监测数据 ,利用 103 个浅层地下水的 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 质量浓度(检出个数 35 个)与对应的 Fe^{2+} 质量浓度绘制散点图(图 5)。统计表明淮北平原浅层地下水中 Fe^{2+} 浓度与 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 浓度存在显著的正相关性($r = 0.734$, $p < 0.01$)。高浓度的 Fe^{2+} 加速了地下水中 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 向 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 的转化 ,造成 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 浓度的局部富集。如淮北平原北部宿州市泗县地下水中 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 浓度普遍较高 ,最高可达 0.39 mg/L ,超出地下水Ⅲ类水标准 20 倍。高浓度且强致癌性的 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 使得该区地下水无法饮用。

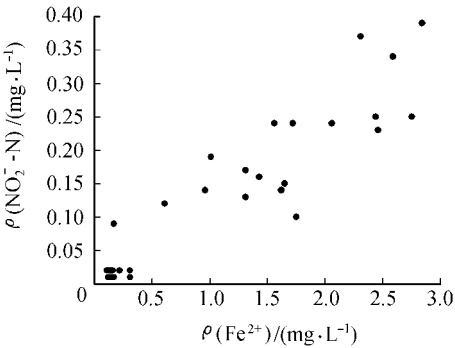


图 5 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 、 Fe^{2+} 质量浓度散点图

4 结 论

a. 淮北平原浅层地下水中“三氮”浓度逐年增大 ,但其浓度值随深度增大而减小 ,且受季节的影响明显。

b. 农药、农业含氮肥料的过量使用和流失是导致淮北平原浅层地下水“三氮”浓度增高的主要原因。
(下转第 52 页)

率高的 15 m,所有的深度上 DO 的质量浓度明显偏高,而 COD 和 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 去除率低的 3 m,所有的深度上 DO 的质量浓度明显偏低。证实 DO 是造成昼夜水质变化的主要因素。而 DO 在剖面上的变化,无论是白天还是夜间,80% ~ 90% 的 DO 迅速消耗在表层 30 cm 区间。残余的 10% ~ 20% 在中、下部被逐渐消耗。根据 DO 的这一变化,可以把湿地床分为上部 30 cm 的好氧段和中下部 30 ~ 90 cm 的缺氧、厌氧段,这种分区在昼夜间都存在,但白天的好氧段和缺氧、厌氧段之间的差距更为明显。

3 结 论

a.垂直潜流人工湿地污染物去除率的变化呈一定的周期性,昼夜差距较大。1 个周期内,从凌晨开始,COD、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 TN 的去除率随时间逐渐增大,15 m 达到最大值,随后逐渐减少,夜间出现最小值。昼夜间去除率的差距 COD 在 15% 左右, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 为 25% ~ 30%,TN 仅为 10% 左右。

b.垂直潜流人工湿地污染物质量浓度沿程变化较为明显。在湿地表层(距湿地底部 60 ~ 90 cm)的好氧段,COD 和 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 质量浓度迅速降低,底部变化幅度较小。而湿地中、下部的兼氧和厌氧环境段有利于反硝化作用进行,故 TN 质量浓度仍然会在沿程有一定的降低。

c.湿地中 COD、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 TN 质量浓度的变化趋势与 DO 显著相关。下行流湿地中的 DO 在剖面上分为 2 个区,表层 30 cm 为好氧区,中、下层为兼氧和厌氧区。

参考文献：

[1]黄娟,王世和,鄢璐,等.人工湿地污水处理系统脱氮研

(上接第 48 页)

c.地下水“三氮”浓度与包气带厚度成反比,pH 值的变化范围、DO 浓度的高低影响“三氮”的转化方向和速度,另外,高浓度的 Fe^{2+} 是导致局部 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 超标严重的重要因素。

参考文献：

[1]罗泽娇,靳孟贵.地下水“三氮”污染研究进展[J].水文地质工程地质,2002(4):65-69.
[2]乔丛林,史明礼,苏娅,等.淮北平原地区水文特征[J].水文,2000(3):55-58.
[3]吴师.安徽省淮北地区地下水环境质量状况及保护措施[J].水资源保护,2002(2):26-29.

究进展[J].电力环境保护,2006,22(5):33-36.
[2]BRIX H. Function of macrophytes in constructed wetlands[J]. Water Science and Technology,1994,29(4):71-78.
[3]黄娟,王世和,雒维国,等.植物光合特性及其对湿地 DO 分布、净化效果的影响[J].环境科学学报,2006,26(11):1828-1832.
[4]FENNESSY M S,CRONK J K,MITSCH W J. Macrophyte productivity and community development in created freshwater wetlands under experimental hydrological conditions[J]. Ecol Eng,1994,2(4):469-484.
[5]黄承才.富营养化水中 14 种野生植物光合和营养吸收的相关性[J].绍兴文理学院学报,2001,21(3):52-56.
[6]POLPRASERT C,KHATTIWADA N R. An integrated kinetic model for water hyacinth ponds used for wastewater treatment[J]. Water Research,1998,32(1):179-185.
[7]王庆安,黄时达,孙铁珩.湿地植物光合作用向水体供氧能力的试验研究[J].生态学杂志,2000,19(5):45-51.
[8]雒维国,王世和,黄娟,等.植物光合及蒸腾特性对湿地脱氮效果的影响[J].中国环境科学,2006,26(1):30-33.
[9]王宝贞,王琳.水污染治理新技术:新工艺、新概念、新理论[M].北京:科学出版社,2004.
[10]鄢璐,王世和,雒维国,等.运行条件下潜流型人工湿地溶氧状态研究[J].环境科学,2006,27(10):2009-2013.
[11]国家环境保护总局.水和废水监测分析方法[M].4 版.北京:中国环境科学出版社,2002.
[12]付融冰,朱宜平,杨海真,等.连续流湿地中 DO、ORP 状况及与植物根系分布的关系[J].环境科学学报,2008,28(10):2036-2041.
[13]BRIX H. Treatment of wastewater in the rhizosphere of wetland plants-the rootzone method[J]. Water Science and Technology,1987,19:107-118.
[14]吴晓磊.人工湿地废水处理机理[J].环境科学,1996,16(3):83-86.

(收稿日期:2009-09-10 编辑:徐娟)

[4]阮晓红,王超,朱亮.氮在饱和土壤中迁移转化特征研究[J].河海大学学报:自然科学版,1996,24(2):51-55.
[5]乔光建,张均玲,唐俊智.地下水氮污染机理分析及治理措施[J].水资源保护,2004(3):9-12.
[6]邱汉学,刘贵群,焦超颖.“三氮”循环与地下水污染:以辛店地区为例[J].青岛海洋大学学报,1997,27(4):533-538.
[7]郭建华,彭永臻.异氧硝化、厌氧氨氧化及古菌氨氧化与新的氮循环[J].环境科学学报,2008,28(8):1489-1498.
[8]梁秀娟,肖长来,盛洪勋,等.吉林市地下水中“三氮”迁移转化规律[J].吉林大学学报:地球科学版,2007,37(2):335-340.

(收稿日期:2009-03-09 编辑:徐娟)