地下水硝酸盐污染的研究进展

张 洪[1,2],王五一[1],李海蓉[1],杨林生[1],吴爱民[3]

(1.中国科学院地理科学与资源研究所,北京 100101;2.中国科学院研究生院,北京 100049;3.中国地质环境监测院,北京 100081)

摘要:综述了地下水硝酸盐的迁移转化机理、地下水硝酸盐来源、地下水硝酸去除和地下水中硝酸盐污染的风险评估几个方面的研究进展,并提出了存在的问题和将来值得重视的研究方向。

关键词:硝酸盐;地下水;机理研究;综述

中图分类号:X523 **文献标识码**:A **文章编号**:1004-6933(2008)06-0007-05

Review of research on nitrate pollution in groundwater

ZHANG Hong[1,2], WANG Wu-yi[1], LI Hai-rong[1], YANG Lin-sheng[1], WU Ai-min[3]

(1. *Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing* 100101, *China*; 2. *Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100049, *China*; 3. *China Institute of Geological Environment Monitoring, Beijing* 100081, *China*)

Abstract: The transportation and transformation mechanisms, the sources, the treatment methods and the risks of pollution of nitrates in groundwater are reviewed. The existing problems and aspects that need further study are also discussed.

Key words: nitrate; groundwater; mechanism research; review

世界上可供人类使用的淡水中,68%是地下水,随着地表水污染的加重,人们对地下水的依赖程度不断上升。但是,近年来的监测结果显示,地下水也受到一定程度的污染,如硝酸盐污染,地下水中硝酸盐的浓度正在逐年增加,在美国、加拿大、日本、欧洲、澳大利亚等地区都有类似的报道[1-3]。硝酸盐污染问题与人类健康密切相关,饮用含高浓度硝酸盐的地下水后,水中硝酸盐转化为亚硝酸盐后,人和动物因缺氧而患高铁(即变性)血红蛋白症[4-5],还有可能使人体发生消化系统癌变[4],所以世界许多国家和机构都规定了地下水 NO_3^--N 质量浓度的标准,世界卫生组织规定的饮用水 NO_3^--N 质量浓度的标准低于 11.3 mg/L(1984 年)[6],我国规定饮用地下水源的Ⅲ类标准 NO_3^--N 质量浓度为 20 mg/L(GB/T14848—93)。地下水硝酸盐污染的问题已成为国际上普遍关注的问题[7-10]。

1 地下水硝酸盐的迁移转化机理研究

1.1 迁移转化的定性研究

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[11]。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[12];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[13]。

从图 1 可以看出,土壤中的氮循环(包括硝酸盐

基金项目:科技部国际科技合作项目(2007DFC20180),科技部"十一五"科技支撑计划课题(2006BAD01B06-2);科技部"十一五"科技支撑课题(2007BAC03A11-07)

作者简介:张洪(1979—),女,山东定陶人,博士研究生,研究方向为环境与健康。E-mail:zhangh.05b@igsnrr.ac.cn

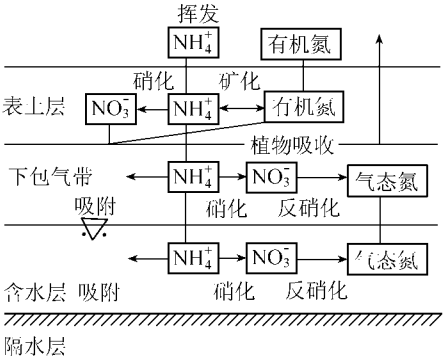

图 1　地下水氮循环转换示意图

的渗出)是地下水硝酸盐迁移转换的一个重要过程。研究表明,土壤的许多特性都影响氮在其中的迁移转换,最主要的是土壤的成分和水分[14]。此外,土壤的 pH 值、透气性、温度等也通过改变微生物的生态条件而影响氮的迁移转化。如土壤中黏粒含量的增加,利于土壤对 NH_4^+-N 和有机氮的吸附,同时水土系统的厌氧程度提高,利于反硝化作用的进行[14-15]。pH 值的升高或降低都减缓硝化作用的进行[12];pH 值增大时,土壤有机体主要吸附 NH_4^+-N;pH 值降低时,主要吸附硝酸盐[16]。

1.2　迁移转化的定量研究

目前人们对地下水中氮迁移转化规律的研究转到定量研究,并成为研究的热点和难点。一种是通过室内土柱试验和野外大田试验进行实测模拟分析;还有一种是通过建立数学模型进行数值模拟分析,预测污染物浓度的时空变化规律。

实验室内,经典的土柱实验法因其经济灵活的特点,仍占主要地位[17]。董悦安等[18]进行了 2 个土柱模拟菜田施肥(化肥)残存量的实验,结果表明,土柱中化肥残存量的 72.08% 和 47.44% 从渗出水中流出,并依据氮的转化过程,将其在土柱内的物理、化学及生物化学作用的过程分为吸附作用、硝化作用增强和硝化作用减弱 3 个阶段。

室外的人工渗滤池试验和现场模拟灌溉实验,由于更接近于实际条件,也被一些学者使用。黄绍敏等[19]采用田间试验及人工渗滤池试验方法,研究了土壤中 NO_3^--N 含量的影响因素;美国 Ellsworth 等[20](1996)在露天试验场进行了 2 m × 2 m 的微区试验,研究了 NO_3^--N 随水流在非饱和土壤中的运移规律。

除上述提及的室内和野外试验模拟外,数学模型作为一种有效分析手段在国内外也取得了重要研究成果。一种是对地下水中硝酸盐行为的模拟,如 Lerner 等[21]对硝酸盐在含水层的迁移转化规律的模拟、区域水文地质系统中迁移转化模型的研究及其解析方法的应用。还有一种是对水土系统中氮循环的模拟,如美国盐土实验室开发的用于模拟非饱和介质中一维水分、热和溶质运移过程的 Hydrus-1D 水氮联合模型,美国康乃尔大学研究开发的 LEACHM(Leaching Estimation And Chemistry Model)数学模型,能够描述土壤中水分、氮素迁移转化的物理化学过程,此外,还有模拟氮素在土壤中运移、转化机理的 DRAINMOD 模型、CREAMS 模型等[22]。现在对地下水的氮循环研究逐渐发展到将包气带-饱和带结合起来建模,如 Geng 等[23]将氮循环过程看作"灰箱",模拟了土壤中氮循环和硝酸盐渗出量,硝酸盐从土壤到含水层的迁移量及其二者的耦合模型。

2　地下水硝酸盐来源的研究

2.1　地下水硝酸盐污染的主要来源

国内外关于地下水硝酸盐污染来源的研究较为丰富[24-26],有关部门和专家相继研究并报道了引起地下水硝酸盐污染的因素: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,等等[25-27]。

其中大多数研究表明农区大量使用氮肥和牧区畜禽粪便的分解淋失是地下水硝酸盐浓度上升的最主要原因,特别在农村大面积的硝酸盐污染地区[27-29]。Insaf 等[24]用 kringing 差值方法分析了日本岐阜地区的硝酸盐污染现状,并用 GIS 图层叠加的方式讨论不同的土地利用方式对地下水硝酸盐污染的影响,分析结果表明该地区大部分区域地下水硝酸盐含量超标,同时蔬菜地区的地下水硝酸盐含量比城市地区、稻米种植区域的含量高。史静等[30]对滇池流域地下水硝酸盐污染状况的研究表明,浅层地下水硝酸盐浓度高于深层地下水的浓度,不同功能区对地下水硝酸盐浓度影响的大小顺序为:蔬菜种植区—花卉种植区 > 传统农作物种植区 > 城郊结合部 > 工矿区 > 昆明市主城区,氮肥投入量和地下水硝酸盐浓度成明显正相关。关于这方面的研究还有高旺盛等[31]对黄淮海平原典型集约农区地下水硝酸盐污染的研究,巩建华等[32]对河北省藁城市蔬菜种植区的地下水硝酸盐污染的研究,高阳俊等[33]对滇池流域地下水硝酸盐污染的调查分析,这些研究都得出类似的结论。

2.2　地下水硝酸盐污染源的同位素研究

随着同位素技术在环境科学中的应用,越来越多的学者开始尝试用同位素较为精确地判别地下水中硝酸盐的来源。其中,N 同位素方法被认为是一种判别地下水硝酸盐污染源的有效方法,为硝酸盐

污染的防治提供了主要信息。

国外在 20 世纪 70 年代就有利用^{15}N来识别污染来源的报道,现在利用^{15}N识别硝酸污染来源的技术较为成熟[34-37],如 Rivers 等[37]利用^{15}N分析了英国诺丁汉地区舍伍德砂岩含水层中氮污染来源,研究表明污染源主要来自于农用化肥和点源污染;Spalding 等[38]利用^{15}N分析了朝鲜半岛 Cheju 地区地下水硝酸盐污染来源,表明污染主要来自对柑橘施用的化肥,Seogwipo 地区主要来自人类的生活垃圾及动物的粪便等;张翠云等[39]利用^{15}N讨论了石家庄地下水硝酸盐污染主要来源,结果表明该区西北部地下水中NO_3^--N 主要来源于灌溉污水,东部来自动物粪便和生活污水,其他部分主要来自于化肥。

由于污染源的^{15}N值是一个范围,它必须根据现实的土地利用情况等其他一些参数才能做出准确的判断[40],Komor 等[41]对明尼苏达州某地区的地下水硝酸盐污染的研究,也说明了这点。此时NO_3^-中氧同位素在某些情况下能弥补氮同位素的不足以及更有效地识别反硝化作用[42],从 Amberger 等[43]首次测定NO_3^-中氧同位素以来,氧同位素技术无论在检测技术还是应用方面都有了很大的发展。如周爱国等[44]利用地下水硝酸盐的$\delta^{15}N$和$\delta^{18}O$资料分析,结果表明河南林州市和安阳县饮用水中NO_3^-主要来自农家肥和化肥。根据研究需要,也有科学家引进碳同位素[45]或硼同位素[46]进行判断,但是这些都不如氧同位素应用广泛[40,47]。

3 地下水硝酸盐去除的研究

去除大面积的地下水硝酸盐污染是一个世界性的难题,目前除了自然净化过程中反硝化作用外,没有特别有效的方法[13]。除去局部地下水中的硝酸盐,主要靠工程来解决,处理方法上主要有生物法脱氮与非生物法脱氮。

非生物法脱氮主要包括离子交换法、反渗透膜法、电渗析膜法、化学还原法、蒸馏法以及注水和抽水工程方法等[48-49],这些方法在地表水深度处理中应用较多,应用于地下水的脱氮处理研究均处于研究阶段,并且尚存在很多问题有待于深入研究 如电渗析膜法成本高、维护困难;离子交换法虽然具有较成熟的经验,可选择性去除硝酸盐,但只是将硝酸盐集中于介质或废液中,起到了废物转移或浓缩的作用,并没有彻底地将硝酸盐氮去除,再生高浓度废液同样需要处理,所以此法在应用上受到一定的限制[50];化学还原法是指利用一定的还原剂还原水中的硝酸盐从而去除硝酸盐,这种方法能快速去除硝酸盐,适应不同反应条件,所以近几年关于化学催化去除硝酸盐的研究也较多[51-53],但是无论以金属元素还是氢气、甲酸、甲醛等作为还原剂,都容易形成副产物[54]。

生物处理技术是利用自然界存在的反硝化作用(在微生物作用下使NO_3^--N 最终转化为N_2O或N_2的过程)[55],进而采取措施强化这一作用使地下水中的硝酸盐减少的技术。由于生物处理具有高效低耗的特点,因此生物脱硝研究较多[50-56],根据处理位置的不同,分为原位生物脱氮技术和异位生物脱氮技术。

原位生物脱氮技术在国内外研究较多[56-60],其修复过程主要依赖于地下水体中的反硝化细菌和人为创造的促进反硝化反应的条件[50],如利用种植相应的植被[56]、往地下水中投加锯末[60]等 SOC(固相有机碳)材料,为地下水中硝酸盐的去除提供碳源。原位生物脱氮技术对于浅层地下水中的硝酸盐来说,由于不用抽取和运输地下水,基建费和运行费用较低,方法也简单,但随着地下水深度的增加,费用将显著增加,同时如果向水中投加的营养物质不适量,就会造成二次污染,而且基质由于受到地质条件的影响,很难均匀地分布于地下蓄水层中[50,54]。

异位生物脱氮技术主要是将地下水抽到地面,利用生物反应器(如固定床[61]、流化床[62])等脱氮。生物脱氮的方法包括自养生物脱氮和异养生物脱氮。自养生物脱氮技术利用无机碳源,以氢或硫及硫的化合物为主要的电子供体,分为氢自养反硝化[63]和硫/石灰石自养反硝化[64],这一方法经济、简单,但是硫/石灰石自养反硝化存在副污染,氢自养反硝化有反应慢等缺点[50]。异养生物脱氮技术是以有机物(甲醇、乙醇、醋酸等)为反硝化基质,这类方法比自养反硝化技术反硝化速度快,但是如果投加的有机基质不足,则易导致水中亚硝酸盐氮的积累,若投加的基质过量,则残留的有机基质带来二次污染[50]。也有研究者将两者结合起来进行脱氮[60]。

随着研究的深入,又出现了一系列新的去除硝酸盐的生物新技术,如电极生物膜[65-66]、生物脱氮墙[67]、FeO^0生物脱氮和动电/铁墙工艺[68]等。

总的来说,去除地下水硝酸盐污染的方法各有利弊,所以不同的研究者对各种方法的应用前景也有各自的见解,如有的认为催化方法是今后消除地下水硝酸盐污染的主要方法[54],有的认为原位修复、物化方法和生物方法的联合使用将成为治理地下水硝酸盐污染的主要方向[69]。

4 地下水硝酸盐污染风险评估研究

地下水由于其所处地理环境、控制地下水流动

的地质因素和地下水本身流动特点的不同，要发现和确定其是否污染是比较困难的，而一旦发现受到污染，则说明问题已经比较严重，要恢复则更加困难[5]。因此，国内外许多研究者根据调查资料及影响因素，对地下水中硝酸盐的浓度及其可能变化运用不同的数学方法做了预测。

国内外学者有的是估算了地下水中硝酸盐污染的概率。例如美国地质调查局收集全国多个监测点的地下水硝酸盐、全国的土地覆被概况、氮肥使用量、人口密度、土壤特征、地下水深度及其岩层特征等，建立了全国范围的逻辑回归模型，来模拟最近得到补给的地下水中硝酸盐污染的概率，并根据分析结果，绘制了硝酸盐质量浓度大于 4 mg/L 的概率分布图[70]。Mueller 等[71]采用流域特征和土地利用信息，预测了美国中西部地区硝酸盐质量浓度分别大于 3 mg/L 和 10 mg/L 的概率，预测变量包括整个流域的作物，采用这些作物量作为整个地区化肥用量的代替指标。

也有一些学者直接预测了地下水中硝酸盐浓度的大小。Wang 等[72] 用 BP 神经网络（Back Propagation Neural Networks，BPNN）并结合 GIS 的方法预测了华北平原桓台县地下水硝酸盐的含量，描述了该县硝酸盐分布的大致趋势。Insaf 等[24] 用 kringing 差值方法分析了日本 Kakamigahara Heights 地区的硝酸盐污染现状。

5 存在问题和发展方向

对地下水硝酸盐的研究在迁移转化机理、来源分析和去除等方面都有了很大进展，但是仍有一些方面尚待进一步研究，现归纳如下。

a. 有关硝酸盐与健康风险的关系已经研究了 50 多年，但是它的最大污染水平（MCL）仍没有统一的标准，许多国家和地区规定的标准仍有较大差异。

b. 地下水硝酸盐污染是全球普遍存在的问题，除了局部去除硝酸盐的工程措施外，大面积去除仍没有很好的方法，今后要加强这方面的研究。

c. 由于地下水受地理环境、地质条件等多种因素的影响，要确定其是否被污染比较困难，所以依据调查资料和影响因素预测污染物质在地下水中的浓度的变化很有必要。

参考文献：

[1] RIDLEY A M, MELE P M, BEVERLY C R. Legume-based farming in southern Australia: developing sustainable systems to meet environmental challenges [J]. Soil Biology & Biochemistry, 2004, 36(8): 1213-1221.

[2] GOSS M J, BARRY D A J, RUDOLPH D L. Contamination in Ontario farmstead domestic wells and its association with agriculture: results from drinking water wells [J]. Journal of Contaminant Hydrology, 1998, 32(3-4): 267-293.

[3] OVERGAARD K. Trends in nitrate pollution of groundwater in Denmark [J]. Nordic Hydrology, 1989, 15(4/5): 177-184.

[4] CORRE W J, BREIMER T. Nitrate and nitrite in vegetables [M]. Wageningen center for agricultural publishing and documentation, 1979: 85.

[5] 冯锦霞，朱建军，陈立. 我国地下水硝酸盐污染防治及评估预测方法 [J]. 地下水，2006，28(4): 58-62.

[6] WHO. Guidelines for drinking water quality [R]. Geneva: WHO, 1984.

[7] KATTA J R, LIN Jian-ping. Nitrate removal from groundwater using catalytic reduction [J]. Water Research, 2000, 34(3): 995-1001.

[8] POWER J E. Nitrate contamination of groundwater in north America [J]. Agriculture Ecosystem and Environment, 1989, 26: 165-187.

[9] TESSENDORFF H. Nitrates in groundwater: a European problem of growing concern [J]. Aqual, 1985, 4: 192-193.

[10] 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.

[11] 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，2004，20(3): 9-12.

[12] 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.

[13] 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.

[14] 刘翔. 氮对地下水的污染预测模型 [J]. 环境科学，1991，12(6): 8-11.

[15] 阮晓红，张瑛，黄林楠. 微生物在湿地氮循环系统的效应分析 [J]. 水资源保护，2004，20(6): 1-7.

[16] BROADBENT F E, TYLER K B. Effect of pH on nitrogen immobilization in two California soils [J]. Plant and Soil, 1965, 23: 314-412.

[17] 胡国臣，张清敏，王忠，等. 地下水硝酸盐氮污染防治研究 [J]. 农业环境保护，1999，18(5): 228-230.

[18] 董悦安，沈照理，钟佐□. 菜田施肥（化肥）对地下水氮污染影响的实验研究 [J]. 中国地质大学学报，1999，24(1): 101-104.

[19] 黄绍敏，皇甫湘荣，宝德俊，等. 土壤中硝态氮含量的影响因素研究 [J]. 农业环境保护，2001，20(5): 351-354.

[20] ELLSWORTH T R, SHOUSE P J, SKAGGS T H, et al. Solute transport in unsaturated soil: experimental design, parameter estimation, and model discrimination [J]. Soil Sci Soc Am J, 1996, 60: 397-407.

[21] LERNER D N, PAPATOLIOS K T. A simple analytical approach for predicting nitrate concentration in pumped ground water [J]. Ground Water, 1993, 31(3): 370-375.

[22] 樊向阳,齐学斌,黄仲东,等.土壤氮素迁移转化机理研究现状于展望[J].中国农学通报,2006,22(2):254-258.
[23] GENG Q Z, IRARD G G, LEDOUX E. Modeling of nitrofen cycle and nitrate transfer in regional hydro geologic systems [J]. Ground Water,1996,34(2):293-304.
[24] INSAF S,MOHAMED A 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.
[25] 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.
[26] FERNANDO T, WAKIDAA D N L. Non-agricultural sources of groundwater nitrate: a review and case study [J]. Water Research, 2005,39:3-16.
[27] 刘光栋,吴文良.华北农业高产粮区地下水面源污染特征及环境影响研究[J].中国生态农业学报,2005,13(2):125-129.
[28] 邢光喜,施书莲,杜丽娟,等.苏州地区水体氮污染状况[J].土壤学报,2001,38(4):540-546.
[29] HIRATA K M. Pollution of soil and groundwater and its management [M]. Tokyo: Law and Regulations Center Publishing House,1996.
[30] 史静,张乃明,褚素贞,等.滇池流域地下水硝酸盐污染特征及影响因素研究[J].农业环境科学学报,2005,24(S1):104-107.
[31] 高旺盛,黄进勇,吴大付,等.黄淮海平原典型集约农区地下水硝酸盐污染初探[J].生态农业学报,1999,7(4):41-43.
[32] 巩建华,柯尊伟,李季.河北省藁城市蔬菜种植区化肥施用与地下水硝酸盐污染研究[J].农村生态环境,2004,20(1):56-59.
[33] 高阳俊,张乃明.滇池流域地下水硝酸盐污染现状分析[J].云南地理环境研究,2003,15(4):39-42.
[34] ARAVNA R,EVANS M I,CHERRY J A. Stable isotopes of oxygen and nitrogen in source identification of nitrate from septic systems[J]. Ground Water,1993,31(2):180-186.
[35] BLKE J K. DENVER J M. Combined use of groundwater dating, chemical, and isotopic analyses to resolve the history and fate of nitrate contamination in two agricultural watersheds, Atlantic coastal plain, Maryland [J]. Water Resources Research,1995,31:2319-2339.
[36] BRREHER J O, STREBEL S V, SCHMIDT H L. Using isotope fraction of nitrate-nitrogen and nitrate-oxygen for evaluation of microbial denitrification in a sandy aquifer[J]. Journal of Hydrology,1990,114:413-424.
[37] RIVERS C N,BARREYY M H,HISCOCK P F K M,et al. Use nitrogen isotopes to identify nitrogen contamination of the Sherwood sandstone aquifer beneath in the city of Nottingham, United Kingdom[J]. Hydeogeology Journal,1996,4(1):90-102.
[38] SPALDING R F, U Z K,HYUN S W,et al. Source identification of nitrate on Cheju Island, South Korea [J]. Nutrient Cycling in Agroecosystems,2001,61(3):237-246.
[39] 张翠云,王昭,程旭学.张掖市地下水硝酸盐污染源的氮同位素研究[J].干旱区资源与环境,2004,18(1):79-85.
[40] 金赞芳,叶红玉.氮同位素方法在地下水氮污染源识别中的应用[J].环境污染与防治,2006,28(7):531-535.
[41] KOMOR S C, ANDERSON J H W. Nitrogen isotope as indicators of nitrate sources in Minnesota sand-plain aquifers [J]. Ground Water,1993,31(2):260-270.
[42] 张翠云,钟佐,沈照理.地下水硝酸盐中氧同位素研究进展[J].地学前缘,2003,10(2):287-291.
[43] AMBERGER A,SCHMIDT H L. Natürliche isotopengenhalte von nitrate als indikatoren für dessen Herkunft[J]. Geochim Cosmochim Acta,1987,51:2699-2705.
[44] 周爱国,陈银琢,蔡鹤生,等.水环境硝酸盐氮污染研究新方法——^{15}N 和 ^{18}O 相关法[J].中国地质大学学报,2003,28(3):119-224.
[45] VAN GROENIGEN J W,VAN KESSEL C. Salinity induced patterns of $\&^{13}C$ and $\&^{15}N$ in plant tissue and soil organic matter fractions[J]. Soil Sci Soc Am J,2002,66:489-498.
[46] RALPH L S. Combined use of ^{15}N and ^{18}O of nit rate and 11B to evaluate nitrate contamination in groundwater [J]. Applied Geochemistry,2005,20:1626-1636.
[47] 朱琳,苏小四.地下水硝酸盐中氮、氧同位素研究现状及展望[J].世界地质,2003,22(4):396-403.
[48] MARTIN C J, KARTINEN O E, CONDON J. Examination of processes for multiple contaminant removal from groundwater [J]. Desalination, 1994,102:35-45.
[49] HUANG C P. Nitrate reduction by metallic iron[J]. Water Research, 1998,32:2257-2246.
[50] 周玲,金朝晖,李胜业,等.地下水硝酸盐氮的修复技术[J].环境卫生工程,2004,12(3):127-131.
[51] VORLOP K D,TACKE T. Erste schritte auf demWeg zur edelmetall katalysierten nitrate-and nitrit-Entfernung aus Trinkwasser[J]. Chem Ing Tech,1989,61:836-845.
[52] HOROLD S,VORLOP K D,TACKE T,et al. Development of catalysts for a selective nitrate and nitrite removal from drinking water[J]. Catalysis Today,1993,26:21-30.
[53] GASPAROVICOVA D, KRALIK M, KINGER G, et al. Catalytic membrane in denitrification of water: a means to facilitate intraporous diffusion of reactants[J]. Collect Czech Chem Commun,1999,64:502-508.
[54] 张燕,陈英旭,刘宏远.地下水硝酸盐污染的控制对策及去除技术[J].农业环境保护,2002,21(2):183-184.
[55] 吴耀国.地下水环境中的反硝化作用[J].环境污染治理技术与设备,2002,3(3):27-31.

(下转第 67 页)

度也没有明显影响，但是生物量为 4 g/L 时，pH 为 8.01 即促使氨氮浓度很快降低。分析认为，氨氮的去除主要是植物吸收，微生物硝化和挥发这 3 种途径，当 pH 值小于 8.5 促进氨挥发的作用可忽略，pH 值的变化主要是影响微生物的作用。由于植物体表是微生物的栖息场所，植物生物量的增加意味着微生物数量的增加，pH 值的变化对微生物作用的影响更显著。

4 结 论

a. 沉水植物光合作用消耗水中的 CO_2，从而能够使水中的 pH 值上升，促进氮的去除效果。伊乐藻较之菹草能更快地促进水中 pH 值的升高，相应的水中氨氮浓度的下降速率也比菹草快。

b. 植物的生物量对氮的去除有较大的影响，生物量越大，则对氮的去除速率越大。试验条件下，当伊乐藻、菹草的生物量为 4 g/L 时，在一段时间（4 d ~ 20 d）内，氨氮浓度降低了 62% ~ 82%，而 2 g/L 时只降低了 38% ~ 65%。意味着在采用沉水植物去除富营养化水体中的氮时，可以通过适当增加植物密度提高对氮的去除效果。

c. 当沉水植物的生物量较大时，水中 pH 值的微小变化都会引起水中氮浓度较大的变化。意味着在沉水植物净水技术去除富营养化水体中的氮时，由于植物光合作用引起的水中 pH 值的变化在氮去除中也发挥了一定的作用。

参考文献：

[1] 朱伟，张兰芳，操家顺，等. 水污染对菹草及伊乐藻生长的影响[J]. 水资源保护，2006，22(3)：36-39.

[2] QIU Dongru，WU Zhenbin，LIU Baoyuan，et al. The restoration of aquatic macrophytes for improving water quality in a hypertrophic shallow lake in Hubei Provine China [J]. Ecological Engineering，2001，18：147-156.

[3] 李文朝. 富营养水体中常绿水生植被组建及净化效果研究[J]. 中国环境科学，1997，17(1)：53-57.

[4] 王传海，李宽意，文明章，等. 苦草对水中环境因子影响的日变化特征[J]. 农业环境科学学报[J]. 2007，26(2)：798-800.

[5] PETRUCIO M M，ESTEVES F A. Uptake rates of nitrogen and phosphorus in the water by Eichhornia crassipes and Salvinia auriculata[J]. Revista Brasileirade Biologia，2000，60(2)：229-236.

[6] 董浩平，姚琪. 水体沉积物磷释放及其机理[J]. 水资源保护，2004，20(6)：20-23.

[7] 国家环保总局. 水和废水监测分析方法[M]. 4 版. 北京：环境科学出版社，2003：15-500.

（收稿日期：2008-02-19 编辑：高渭文）

（上接第 11 页）

[56] HANS P L，MATTHEW D W，DUANE F R，et al. Nitrate removal in riparian wetland soils：effect of flow rate，temperature，nitrate contamination and soil depth[J]. Water Research，1997，31(4)：841-849.

[57] 郑平，冯孝善. 饮用水的生物脱氮. 环境污染与防治，1997，19(1)：32-35.

[58] TODD L，INGERSOLL，LAWRENCE A B. Nitrate removal in wetland microcosms[J]. Water Research，1998，32(3)：677-684.

[59] ADDY K L，GOLD A J，GROFFMAN P M，et al. Groundwater nitrate remocal in sub soil of forested and mowed riparian buffer zone[J]. J Environ Qual，1999，28：962-970.

[60] LOUIS A S. Nitrate removal from groundwater and denitrification rates in a porous treatment wall amended with sawdust[J]. Ecological Engineering，2000，14：269-278.

[61] NURIZZO C，MEZZANATTE V. Ground water biodenitrification on sand fixed film reactor using sugars as organic carbon source[J]. Water Sci Tech，1992，26，827-834.

[62] LIESSENS J. Removing nitrate with a methylotrophic fluidized bed：technology and operating performance [J]. J AWWA，1993，85(4)，144-154.

[63] MOBAMMED N，ALLAYLA R L，NAKBLA G F. State-of-art review of bioremediation studies[J]. J Environ Sci Health，1997，31(7)：1554-1574.

[64] DARBI T A，VIRARAGHAVAN R B. Comparative evaluation of nitrate removal technologies [R]. SCE/EWRI of ASCE Environmental Engineering Conf Niagara，2002：A 1-13.

[65] SZILVIA S. Hydrogen-dependent denitrfication in a two-reactor bio-electrochemical system [J]. Water Research，2001，35(3)：715-719.

[66] MELLOR R B，RONNENBERG J，CAMPBELL W H，et al. Reduction of nitrate and nitrate in water by immobilized enzymes[J]. Nature，1992，355(20)：717-719.

[67] SCHLIPPER L A，VOJVODIC-VUKLVIC M. Nitrate removal from groundwater using a denitrification wall amended with sawdust：field trials[J]. Environ Qual，1998，27：664-668.

[68] CHEW C F，ZHANG T C. Irrsitu remediation of nitrate contaminated groundwater by elevtrokinetics/iron wall process [J]. Wat Sci Tech，1998，38(7)：135-142.

[69] 张少辉. 地下水中硝酸盐去除的新工艺[J]. 中国沼气，2002，20(3)：13-23.

[70] NOLAN B T，RUDDY B C，HITT K J，et al. Probability of nitrate contamination of recentlty recharged groundwaters in the conterminous United States [J]. Environmental Sciences & Technology，2002，36(10)：2138-2145.

[71] MUELLER D K，RUDDY B C，BATTAGLIN W A. Logistic model of nitrate in streams of the upper-midwestern United States [J]. Journal of Environmental Quality，1997，26(5)：1223-1230.

[72] WANG M X，LIU G D，WU L Y，et al. Prediction of agriculture derived groundwater nitrate distribution in North China Plain with GIS-based BPNN [J]. Envrionmental Geology，2006，50：637-644.

（收稿日期：2007-05-16 编辑：高渭文）