

地下水位上升过程硝态氮(硝酸盐)污染变化规律研究

刘鑫^{1,2}, 左锐^{1,2*}, 孟利^{1,2}, 李鹏³, 李志萍³, 何柱锬^{1,2}, 李桥^{1,2}, 王金生^{1,2} (1.北京师范大学水科学研究院, 北京 100875; 2.地下水污染控制与修复教育部工程研究中心, 北京 100875; 3.北京市水文地质工程地质大队, 北京 100195)

摘要: 地下水位上升会造成包气带外源污染物的输入,如硝态氮,同时引起浅层地下水水环境变化.为了研究水位上升过程对硝态氮(硝酸盐)的影响,选取北京市通州区代表性介质,建立室内砂槽实验,探究水位上升过程硝态氮的二维迁移转化规律.实验结果表明:随着地下水位上升,砂槽从上至下,从左至右,溶解氧和氧化还原电位含量均逐渐降低,地下水逐渐向还原环境转变.浅层地下水通过对包气带污染物的浸溶,硝态氮和铵态氮含量存在明显的分层特征,埋深越小,其硝态氮和铵态氮的含量越高.地下水位上升过程的侧向径流,有利于硝酸盐在地下水中的迁移转化,侧向水流方向下游,铵态氮存在升高的风险.因此,地下水位上升对硝态氮的影响不容忽视.

关键词: 地下水位; 上升过程; 硝态氮; 砂槽实验

中图分类号: X523 文献标识码: A 文章编号: 1000-6923(2021)01-0232-07

Study on the variation law of nitrate pollution during the rise of groundwater level. LIU Xin^{1,2}, ZUO Rui^{1,2*}, MENG Li^{1,2}, LI Peng³, LI Zhi-ping³, HE Zhu-kun^{1,2}, LI Qiao^{1,2}, WANG Jin-sheng^{1,2} (1.College of Water Sciences, Beijing Normal University, Beijing 100875, China; 2.Engineering Research Center of Groundwater Pollution Control and Remediation, Ministry of Education, Beijing 100875, China; 3.Beijing Institute of Hydrogeology and Engineering Geology, Beijing 100195, China). *China Environmental Science*, 2021,41(1): 232~238

Abstract: Rising groundwater levels will cause the input of exogenous pollutants, such as nitrate, in the vadose zone, and at the same time alter the shallow groundwater environment. In this study, we aimed to measure the effect of water level rise process on nitrate nitrogen (nitrate). Representative media were selected in Tongzhou District, Beijing, and an indoor sand tank experiment was established to simulate the migration and transformation of nitrate nitrogen during the groundwater level rise process. The experimental results show that as the groundwater level continues to rise, from the top to the bottom of the sand tank, and from the left side to the right side, both the dissolved oxygen and redox potential gradually decrease, and the groundwater gradually changes to the reducing environment. The shallow groundwater show the obvious characteristics of nitrate and ammonium stratification as a result of pollutants leaching into the vadose zone. The lower the burial depth, the higher the nitrate nitrogen and ammonium nitrogen content. There is also lateral runoff during the rise of the groundwater level, which is conducive to the migration of nitrate in groundwater. Along the direction of lateral water flow, there is a risk of increasing ammonium nitrogen. Therefore, the influence of groundwater level rise on nitrate nitrogen cannot be ignored.

Key words: groundwater level; rising process; nitrate; 2D tank experiment

地下水是北京市的主要供水水源,其分布广泛、供水量稳定,在城乡居民生活用水、农业用水等方面发挥着重要作用^[1].2014 年以前,北京市的地下水由于多年持续过量开采,地下水位总体呈现大幅度下降态势,局部存在降落漏斗区,漏斗区中心水位最大降幅超过 46m^[2].2014 年以后,随着我国水资源管理制度日趋完善,水资源利用趋于合理化.在多个大型水源地减量开采、潮白河道人工回灌技术实施、南水北调中线工程回补等作用下,北京地区地下水位由整体下降转变为部分地区上升^[2].以怀柔应急水源为例,其地下水位上升最大幅度超过 11m^[3-4].这一转变已经引起了许多学者的关注,并展开了相关

研究^[5-8].地下水位上升,包气带中的污染物被浸泡而进入地下水中,导致地下水污染物含量增加.同时地下水位上升过程水动力条件发生改变,也会使地下水环境条件及水化学条件产生变化^[9],进而影响地下水化学组分的迁移转化.

影响地下水位变化的原因有很多,包括自然条件下,丰枯水期的水位自然波动、潮汐过程、客水、地表水补给地下水过程等,以及人类活动影响下,人

收稿日期: 2020-05-09

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(41877181,41831283,41672228); 北京市地勘局项目(PXM2020_158305_000014);111 引智计划项目(B18006)

* 责任作者, 教授级高工, zr@bnu.edu.cn

工开采和回灌补给、农业灌溉、水利工程建设等^[8,10-12]。水位波动影响下污染物迁移转化过程是近年来的研究热点,国内外许多学者对地下水位变化的过程进行了研究^[13-17]。以往研究除关注水位变化对土壤水分特征规律影响^[15-16,18]以外,主要关注地下水中特征组分的迁移转化过程,例如在地下水位变化过程中,铁锰^[9,13]、砷^[12]、碘^[19]、苯系物^[16]、石油烃^[14]含量变化规律及迁移转化过程,但是对于硝态氮的研究并不多见^[17,20]。前人研究表明,地下水环境,特别是氧化还原环境,是影响与控制水位变化过程污染物含量变化的重要因素^[12-13]。在静态条件下,垂直剖面上的氧化还原电位通常从包气带向饱和带递减,但如果地下水位变化,其氧化还原电位也必然产生变化。地下水位上升以后,一部分包气带转变为饱和带,使得溶解氧降低,浅层地下水的氧化还原电位会随之不断降低^[9]。除了氧化还原条件,pH 值、溶解氧(DO)、有机碳含量(DOC)也是影响污染物迁移转化的因素^[21-22]。

硝酸盐在北京部分地区的土壤、地下水中广泛存在^[23-24]。由于包气带土壤胶体一般带负电荷,硝酸盐不易被土壤颗粒吸附,随着地下水位上升,易溶于地下水中而发生迁移^[21]。硝酸盐参与的转化作用包括硝化作用、反硝化作用和异化还原作用等,这些作用需要在微生物的介导下完成^[25],已有许多学者做了较为深入的研究^[21-22],但是,缺乏对地下水位上升这一特殊背景条件的针对性和系统性研究。目前,地下水位上升条件下,硝态氮含量变化规律室内试验以土柱试验为主^[6,15,26],探究水位上升过程的硝酸盐一维迁移转化过程,对于二维迁移转化过程鲜少有研究。二维实验与一维实验相比,更能真实的还原地下水的氧化还原环境。因此,本文以典型污染物硝酸盐为研究对象,针对地下水位上升过程,建立室内二维砂槽试

验,高度还原地下水位上升过程,分析氧化还原环境及其他因素的变化,从而探究硝酸盐含量的变化规律,为北京市水资源管理与保护提供科学支持。

1 材料与方法

1.1 实验装置设计

试验设计有机玻璃砂槽,长 130cm,高 110cm,宽 40cm。左右两侧各设置 5cm 的进出水区,与砂槽主体通过布水板相连,以保证砂槽进水均匀。为还原地下水原始环境,并减少实验过程水分的蒸发,在砂槽顶部加盖密封,并设有进气孔。砂槽主体有机玻璃外部整体贴有黑色遮光薄膜,模拟避光环境。砂槽主体正面等间距布设有多排取样孔,均连接有土壤溶液采样器(荷兰,Rhizon MOM 型号:19.60.22F),装置如图 1 所示。砂槽顶部和底部分别填充有 10cm 厚石英砂,中间填充 90cm 厚的细砂(取自北京市通州区代表性介质)。进水区由外侧进水孔与装有实验水源的马氏瓶相连,通过蠕动泵控制进出水流速,以控制砂槽内水位缓慢上升,进而模拟地下水位上升过程。具体模拟:随着水位上升,包气带污染物浸溶进入地下水过程。

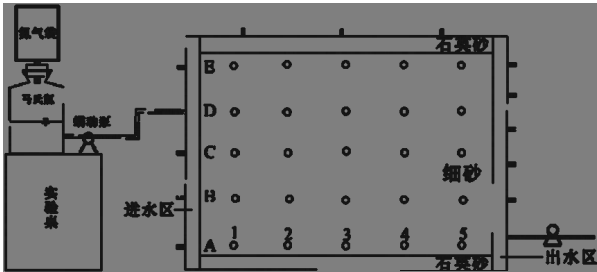


图 1 实验装置
Fig.1 Experimental facilities

1.2 实验材料

表 1 试验介质理化性质
Table 1 Physicochemical properties of experimental soil

天然含水率(%)	NH ₄ ⁺ -N(mg/kg)	NO ₃ ⁻ -N(mg/kg)	全氮(mg/kg)	有机碳(%)	铁(mg/kg)	锰(mg/kg)	粒径分布(μm)		
							D10	D50	D90
5.6	1.43	3.06	131	0.06	3.74	0.081	71.0	178.3	355.7

选取北京市平原区冲洪积扇中下部代表性的土壤介质填充砂槽。试验土样采自通州副中心张家湾镇国土资源部平原区地下水-北京野外基

地内。该基地地处潮白河冲洪积扇的中下部,第四纪沉积物受河流冲洪积而成,厚度 150m 左右^[27]。受季节性补给、农作物灌溉补给影响,基地内地

下水位埋深自 2015 年以后在 5.0~6.0m 范围内波动.包气带岩性以细砂、砂质黏土等为主,本次试验选取埋深 3.0m 左右的细砂填充砂槽.为保证样品微生物活性,采样后 48 小时内填充.每装填 5cm 的场地介质,用橡胶锤多次锤击、夯实以使介质

孔隙率最大限度接近场地介质的天然状态.介质的理化性质见表 1.实验用水采用试验土样采集点的浅层地下水,采集时间与实验时间同步,每日早 8 时采集后密闭,静置,用于当日实验.水化学指标参考表 2.

表 2 试验水源主控指标
Table 2 Main control indices of experimental groundwater

水源	$\text{NH}_4^+-\text{N}(\text{mg/L})$	$\text{NO}_3^--\text{N}(\text{mg/L})$	总氮(mg/L)	DOC(mg/L)	pH 值	DO(mg/L)
浅层地下水	0.06	0.28	0.39	5.42	7.74	3.49

1.3 分析仪器与方法

试验主要仪器设备包括紫外分光光度计 pH 计、便携式溶解氧仪便携式多功能水质分析仪.

NH_4^+-N 的测定采用纳氏试剂比色法, NO_2^--N 采用重氮偶合分光光度法, NO_3^--N 的测定采用紫外分光光度法,pH 值用 pH 计测定,溶解氧用便携式溶解氧仪测定,电导率、Eh 值用便携式多功能水质分析仪测定.DOC 用燃烧氧化-非分散红外吸收法测定.

水样测试指标包括 NH_4^+-N 、 NO_2^--N 、 NO_3^--N 、DOC、pH 值、电导率、Eh 值、溶解氧.

1.4 实验方法

试验在室温环境下进行,温度为 $(18\pm 2)^\circ\text{C}$.实验之前,先将砂槽底部进水孔用胶管与氮气瓶相连,其余孔封闭,顶部进气孔打开,使介质空隙中的空气排出.然后关闭底部进水孔,停止通入氮气,顶部进气孔打开,与大气相通.首先通过马氏瓶向进水孔注入曝过氮气的浅层地下水,通过控制进水量调节水槽内水位高度,使砂槽水位处在距离柱底 30cm 处,模拟地下水的原始饱和带,静置 72 小时,待砂槽内毛细现象稳定.利用蠕动泵将 15L 浓度为 1g/L 的硝酸钠溶液通过砂槽顶部进水孔注入砂槽内,使其均匀的喷洒在砂槽顶端石英砂上.调节砂槽的进出水流速,保持进水流速 10mL/min,出水流速 5mL/min,使地下水位缓慢上升,地下水位上升过程中持续 32 天.每上升 10cm 停水稳定 6h,实验周期持续一个月.自水位上升起每 24~48h 取样测试.砂槽内具体水位上升情况见图 2,受水样采集以及毛细现象影响,地下水位存在短时刻小幅下降,总体规律是缓慢上升.

2 结果与讨论

2.1 水位上升带垂向不同位置环境指标变化规律

地下水的温度、pH 值、溶解有机碳(DOC)、氧化还原条件等指标是硝酸盐生物地球化学过程的重要控制指标,以水位上升带 B3、C3、D3 位置处为例,分析其环境指标变化.

在整个实验过程中,地下水中温度、pH 值和 DOC 变化不显著.各位置处地下水温度在 $(17\pm 2)^\circ\text{C}$ 范围内波动,pH 值变化范围为 7.5~8.1,地下水总体为弱碱性.图 2 为水位上升过程垂向上各位置溶解氧变化,从整体上看,随着地下水位的上升,B3、C3、D3 三个位置 DO 含量均经历波动上升、达到最高、逐渐下降至稳定的过程.水位上升带垂向不同位置氧化还原电位(Eh)变化见图 3,其变化规律与溶解氧类似.

在水位刚到达 B3(水位 35cm)、C3(水位 55cm)、D3(水位 75cm)时,各位置处 DO 含量分别为 4.08,4.62,5.33mg/L,高于进水的地下水背景值 3.49mg/L,且表现出水位上升带从下到上,DO 初始含量逐渐升高的规律.这是由于水位上升之前,水位上升带介质空隙与顶部进气孔存在气体交换,氧气随着空气填充在介质空隙中.水位恢复过程中氧气被截留在介质空隙中,并逐渐溶于地下水中,使得地下水中的 DO 含量较背景值增大,且随着位置升高,与顶部气体交换越充分,介质空隙中氧气含量越高,溶解进入地下水中的氧气含量也越高.随着水位上升,各个位置由包气带进入饱和带后,DO 含量仍然保持波动增加的趋势,直至在当水位高出各位置 10~20cm 后(试验 10~21d)达到最高点.这主要是由于当包气带变为饱和带以后,其内仍然存留有一部分氧气可以继续溶解于地下水中,有研究表明,包气带变为饱和带初期,仍然有 15%空隙体积内充满空气^[8].当各位置 DO 含量达到最高点以后,随着地下

水位上升,各位置处的溶解氧含量均逐渐降低并向地下水背景值恢复.介质空隙中截留的氧气量是一定的,随着氧气逐步被溶解以及进水区低 DO 含量地下水的持续补给,地下水中的 DO 含量逐渐降低并向地下水背景值恢复.达到稳定后,B3、C3、D3 处溶解氧在 3.41~4.34mg/L 之间,且 B3 点的溶解氧最低,D3 溶解氧最高,C3 位于中间,越靠近砂槽底部,与大气接触越少,越接近于进水背景值;且位置越低,地下水渗流路径越长,与补给水联系越不密切,容易形成相对还原的环境.

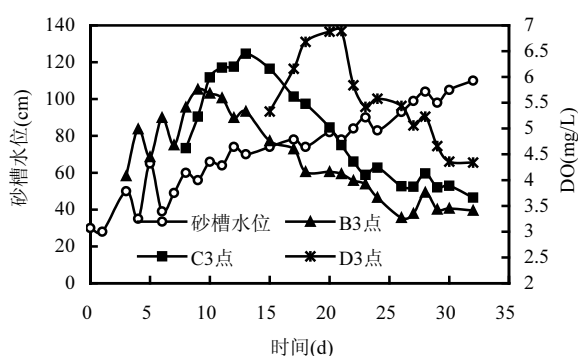


图2 地下水位上升过程溶解氧(DO)变化(垂向)

Fig.2 Dissolved oxygen (DO) Variations during groundwater level rise (in the vertical direction)

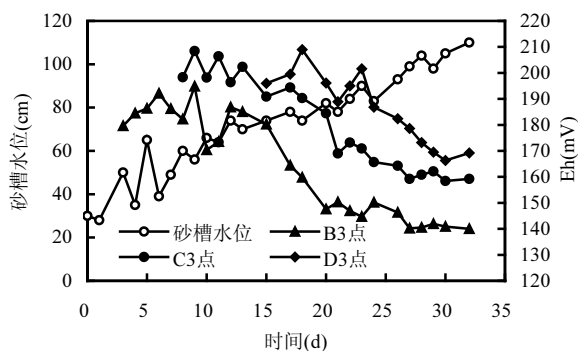


图3 地下水位上升过程氧化还原电位(Eh)值变化(垂向)

Fig.3 Redox potential (Eh) Variations during groundwater level rise (in the vertical direction)

2.2 水位上升带侧向径流路径环境指标变化规律

以砂槽的 C1~C5 取样点侧向断面为例,探讨水位上升过程侧向环境指标变化,侧向断面各点,地下水中温度、pH 值和 DOC 变化不显著.各位置处地下水温度在(17±2)℃ 范围内波动,pH 值变化范围为 7.7~8.1,地下水总体为弱碱性.图 4 为侧向径流断面溶解氧随时间变化.可以看出,同一时间,从进水区一

侧到出水区,各位置溶解氧(DO)含量总体上呈现下降的趋势.在相同位置处,随着实验时间的增加,溶解氧(DO)含量也逐渐降低,表现一定的分层特征.

在实验进行的 17~23d,沿着地下水侧向径流方向,溶解氧的含量逐渐降低,在 C5 位置处达到最低,从 4.32mg/L 降到 3.77mg/L,接近地下水背景值;23d 以后,继续下降,最终 C5 处低于 3mg/L,低于地下水背景值.这主要是由于地下水从进水区进入砂槽中,介质内的氧气经过溶解进入水中,使地下水中的 DO 暂时增加.沿着渗流路径方向,从 C1 至 C5 位置处,与硝酸盐相关的好氧微生物会发生呼吸作用而消耗氧气.有机质也会发生氧化作用而不断消耗溶解氧,使溶解氧逐渐降低.且在进水区补给作用下,C1~C5 这一断面由包气带进入饱和带,随着水位不断升高,渗流路径长度增加,此时地下水与补给水源水力联系减弱,滞留性增加,不容易与补给水源产生水量和氧气交换,导致溶解氧降低,甚至低于地下水背景值.

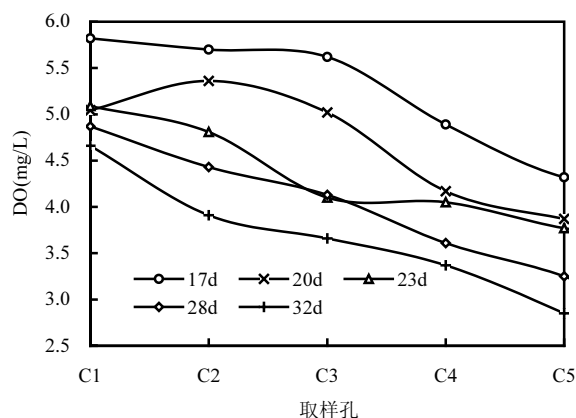


图4 地下水位上升过程溶解氧(DO)变化(侧向)

Fig.4 Dissolved oxygen (DO) Variations during groundwater level rise (in the lateral direction)

2.3 水位上升过程氮素垂向污染变化规律

以 B3、C3、D3 垂向三点为例,分析水位上升过程氮素变化规律.亚硝态氮的测试结果普遍偏低且规律不显著,因此,本文仅对硝态氮和铵态氮的变化规律进行分析.

当包气带存在污染物时,不同深度的地下水硝酸盐初始含量具有明显的分层特征,如图 5.包气带顶部存在硝酸盐污染,且存在下渗.随着地下水位上升,地下水对包气带污染物存在浸溶作用,取样孔位

置越高,地下水接触到的污染物越多,对污染物的浸溶程度越高,进入地下水中的硝酸盐含量越高。

随着实验时间增加,各位置处硝态氮浓度整体呈现先上升,后下降趋势(图 5)。由于各位置硝态氮含量存在分层,随着实验的进行,各层之间由于对流弥散作用,使得上部硝态氮进入下部,下部取样点硝态氮浓度有所增加。随后,随着地下水位上升,各点距离地下水位越来越远,地下水所处的环境向还原环境转变,在微生物的作用下,必然会发生反硝化、异化还原等作用使得硝态氮含量逐渐降低,后趋于稳定。B3、C3 位置处硝态氮浓度值分别由 0.95、4.80 降低至低于 0.15mg/L(按 0.15 计),D3 处硝态氮浓度从 19.80mg/L 降低至 8.85mg/L,在运移过程中,硝态氮的含量分别减少 84.2%、96.9%、55.3%。

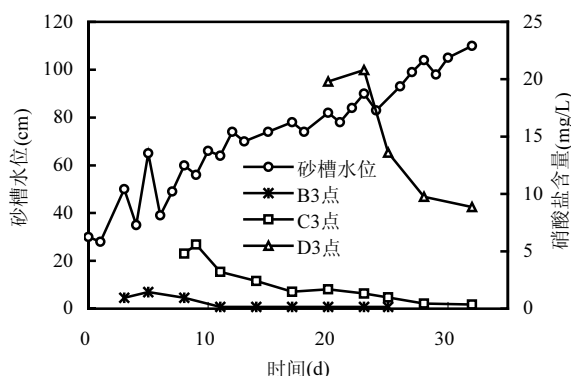


图 5 地下水位上升过程硝酸盐变化(垂向)

Fig.5 Nitrate content variations during groundwater level rise (in the vertical direction)

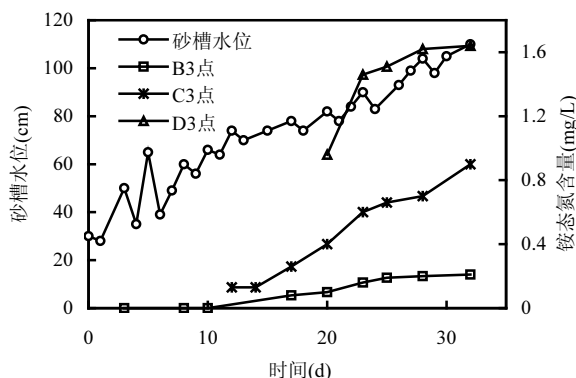


图 6 地下水位上升过程铵态氮变化(垂向)

Fig.6 Ammonium nitrogen content variations during groundwater level rise (in the vertical direction)

如图 6 所示,当水位分别初到 B3、C3、D3 三点时,铵态氮的含量都很低,随着地下水位不断上升,铵

态氮含量明显增加,C3 处铵态氮浓度从 0.13mg/L 上升至 0.9mg/L.D3 处铵态氮浓度从 0.96mg/L 上升至 1.64mg/L.这是由于,水位上升阶段,砂槽内各点均由好氧阶段转变为缺氧阶段,砂槽内溶解氧浓度下降.砂槽中参与硝酸盐转化的硝化作用减弱,反硝化作用、异化和同化还原作用增强,硝态氮在微生物的介导下可以转化为一定的铵态氮.实验介质颗粒对铵态氮存在吸附作用,在实验初期,硝酸盐转化的铵态氮易被吸附于土壤介质颗粒表面,使其在地下水含量依然很低,并未明显升高.随着铵态氮含量的增加,介质对导致铵态氮的吸附达到饱和,更多的铵态氮进入地下水中,B3、C3、D3 位置处的铵态氮含量明显增加.且取样点所处的位置越高,地下水铵态氮上升越明显,这与地下水中硝态氮的分层特征密切相关。

综上所述,地下水位上升过程中,地下水对包气带中的污染物存在浸溶作用,硝态氮污染物会进入浅层地下水,导致浅层地下水中硝态氮和铵态氮含量均明显升高.且在垂向上,地下水中的硝态氮和铵态氮含量存在明显的分层特征,埋深越小,其硝态氮和铵态氮的含量越高。

2.4 水位上升过程氮素侧向污染变化规律

以砂槽的 C1~C5 断面为例,探讨水位上升过程侧向硝态氮和铵态氮变化规律.由图 7 可以看出,沿着地下水侧向径流方向,硝酸盐含量在 C3 点达到峰值,从 C3 至 C5,逐渐减小趋于稳定.这是由于包气带污染物是从砂槽顶部进水(气)口淋入砂槽后,在淋滤过程中,存在优先流,污染物首先到达 C3 点,且 C3 点浓度最高.且在侧向径流影响下,硝酸盐逐渐向 C5 扩散.在扩散的过程中由于水位上升,溶解氧含量降低,存在向铵态氮转化的可能.在实验的第 28 天后,C3 点硝酸盐含量峰值显著降低,此时水位已经达到 1m 左右,此时浸溶进入地下水的硝酸盐显著减少,且向铵态氮转化作用显著。

水位上升过程侧向铵态氮的变化规律如图 8 所示,铵氮含量在 C1~C5 断面存在先增加后降低的趋势.实验第 17~28d,C3 点铵氮含量持续升高,印证了前面硝态氮峰值降低,向铵态氮转化显著的结论。

当包气带存在硝酸盐污染时,随着地下水位的上升,原来的非饱和带变为饱和带,污染物随之浸溶进入地下水中.沿着地下水径流路径方向,从污染物起

始点至下游呈现硝酸盐不断溶解进入地下水的态势。随着远离污染点,溶解氧降低,Eh 值降低,趋于还原环境,有机物提供电子供体,硝酸盐可以发生反硝化,异化还原作用,使其含量逐渐降低,铵氮含量升高。

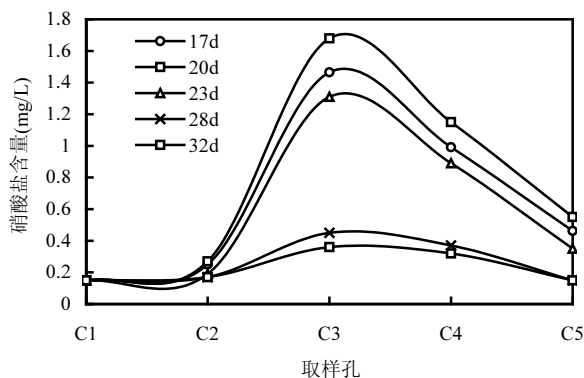


图 7 地下水位上升过程硝酸盐变化(侧向)

Fig.7 Nitrate content variations during groundwater level rise (in the lateral direction)

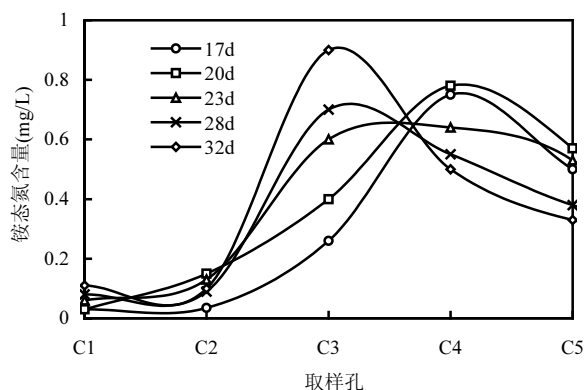


图 8 地下水位上升过程铵态氮变化(侧向)

Fig.8 Ammonium nitrogen content variations during groundwater level rise (in the lateral direction)

因此,地下水位上升过程,沿着水流方向,包气带污染点下游存在铵态氮超标的可能,直至一定的影响半径以外,回归背景值。细颗粒介质对铵态氮存在吸附作用,在一定程度上可以降低地下水铵态氮污染的风险,铵氮由于受细介质颗粒的吸附作用,在本次实验中 C4、C5 两个位置明显下降。因此,水位上升有利于包气带硝酸盐进入地下水中,有利于其在地下水中的迁移转化,导致铵氮存在局部升高的可能。水位上升过程硝态氮、铵态氮的污染不容忽视。

3 结论

3.1 随着地下水位不断上升,从砂槽顶部至底部,

DO 和 Eh 含量表现为波动上升、达到最高、逐渐下降至稳定的过程;从进水区至出水区,DO 和 Eh 含量均逐渐降低,地下水逐渐向还原环境转变。

3.2 浅层地下水通过对包气带污染物的浸溶作用,地下水中的硝态氮和铵态氮总体上均升高。且硝态氮和铵态氮含量存在明显的分层特征,埋深越小,其硝态氮和铵态氮的含量越高。

3.3 地下水位上升过程的侧向径流有利于硝酸盐在地下水中的迁移和转化,沿着侧向水流方向下游,铵态氮存在超标的可能。

参考文献:

- [1] 周 静,王免玲,王建宇,等.北京市地下水中三氮的转化规律探讨[J]. 环境科学导刊, 2017,36(4):5-9.
Zhou J, Wang H L, Wang J Y, et al. Transformation regularity of three forms of nitrogen in Beijing groundwater [J]. Environmental Science Survey, 2017,36(4):5-9.
- [2] 王树芳,李 捷,刘元章,等.南水北调对北京地下水涵养的影响[J]. 中国水利, 2019,(7):26-30.
Wang S F, Li J, Liu Y Z, et al. Impact of South-to-North Water Diversion on groundwater recovery in Beijing [J]. China Water Resources, 2019,(7):26-30.
- [3] 李 阳,乔 玲,张景华,等.怀柔应急备用水源地地下水位及水质分析[J]. 北京水务, 2018,(4):20-23.
Li Y, Qiao L, Zhang J H, et al. Analysis of groundwater level and water quality of emergency standby water sources in Huairou [J]. Beijing Water, 2018,(4):20-23.
- [4] 杨利锦,任 宇,张景华,等.怀柔应急水源地地下水水质变化研究[J]. 城市地质, 2016,11(1):57-61.
Yang L J, Ren Y, Zhang J H, et al. The research on groundwater quality variation in Huairou emergency water source area [J]. Urban Geology, 2016,11(1):57-61.
- [5] 郭士林,叶 春,李春华,等.水位波动对水平潜流人工湿地脱氮效果的影响[J]. 中国环境科学, 2017,37(3):932-940.
Guo S L, Ye C, Li C H, et al. Impact of water level fluctuation on nitrogen removal in horizontal subsurface flow constructed wetlands [J]. China Environmental Science, 2017,37(3):932-940.
- [6] 杜 涛.南水北调入京后北京西南地区地下水水质演变的实验模拟研究[D]. 长春:吉林大学, 2004.
Du T. A study of test simulation on groundwater quality evolution after the South-to-North water transferring in southwestern area, Beijing [D]. Changchun: Jilin University, 2004.
- [7] 刘立才,郑凡东,李炳华,等.南水北调水源在密怀顺水源地回灌的地下水水质变化试验[J]. 水文地质工程地质, 2015,42(4):18-22.
Liu L C, Zheng F D, Li B H, et al. Experiment of groundwater quality change for simulating the South-to-North water into the Mihuashun aquifer [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2015,42(4):18-22.
- [8] Jia M Q, Bian X, Yuan S H. Production of hydroxyl radicals from Fe(II) oxygenation induced by groundwater table fluctuations in a sand column [J]. Science of the Total Environment, 2017,584-585:41-47.

- [9] 左 锐,李 桥,孟 利,等.地下水波动带中细菌群落结构与水质响应关系 [J]. 中国环境科学, 2020,40(4):1687-1697.
- Zuo R, Li Q, Meng L, et al. Response relationship between bacterial community structure and water quality in groundwater fluctuation region [J]. China Environmental Science, 2020,40(4):1687-1697.
- [10] Guo H P, Jiao J J, Li H L. Groundwater response to tidal fluctuation in a two-zone aquifer [J]. Journal of Hydrology, 2010,381(3/4):364-371.
- [11] Deng K, Yang S Y, Lian E G, et al. Three Gorges Dam alters the Changjiang (Yangtze) river water cycle in the dry seasons: Evidence from H-O isotopes [J]. Science of the Total Environment, 2016,562: 89-97.
- [12] Duan Y H, Gan Y Q, Wang Y X, et al. Temporal variation of groundwater level and arsenic concentration at Jiangnan Plain, central China [J]. Journal of Geochemical Exploration, 2015,149:106-119.
- [13] 孟祥菲.地下水位波动带铁锰含量变化规律研究-以沈阳黄家水源地为例 [D]. 长春:吉林大学, 2015.
- Meng X F. Study on variation of Fe and Mn content in fluctuation zone of groundwater level: An example in Shenyang Huangjia Water Source [D]. Changchun: Jilin University, 2015.
- [14] 刘月舫,丁爱中,刘宝蕴,等.地下水位波动带中石油烃污染迁移转化规律综述 [J]. 科学技术与工程, 2018,18(24):172-178.
- Liu Y Q, Ding A Z, Liu B Y, et al. A review of the petroleum hydrocarbon contamination transformation performance in the zone of intermittent saturation [J]. Science Technology and Engineering, 2018,18(24):172-178.
- [15] 杨 洋.考虑地下水位波动的土层污染物运移模型研究 [D]. 保定:河北农业大学, 2015.
- Yang Y. Research on the model of contaminant migration in soil considering groundwater level fluctuation [D]. Baoding: Hebei Agricultural University, 2015.
- [16] 王 颖,汪 洋,唐 军,等.基于 TMVOC 的水位波动带土壤气相抽提模拟 [J]. 中国环境科学, 2020,40(1):350-356.
- Wang Y, Wang Y, Tang J, et al. Numerical simulation of SVE in groundwater table fluctuation zone based on TMVOC [J]. China Environmental Science, 2020,40(1):350-356.
- [17] 李 翔,席北斗,姜永海,等.水位波动带氮素迁移转化规律 [J]. 环境工程学报, 2013,7(12):4703-4708.
- Li X, Xi B D, Jiang Y H, et al. Nitrogen migration and transformation in fluctuation belt of water table [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2013,7(12):4703-4708.
- [18] 史福生.降水和地下水位波动控制下的包气带水分运移研究 [D]. 北京:中国地质大学(北京), 2019.
- Shi F S. A study on water transport in vadose zone controlled by precipitation and groundwater table fluctuation [D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2019.
- [19] 周海玲,苏春利,李俊霞.地表灌溉对沉积含水层中碘迁移释放过程的影响 [J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2018,48(6):1810-1820.
- Zhou H L, Su C L, Li J X. Influence of surface irrigation practices on iodine mobilization in sedimentary aquifers [J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2018,48(6):1810-1820.
- [20] Zhang D, Cui R Y, Fu B, et al. Shallow groundwater table fluctuations affect bacterial communities and nitrogen functional genes along the soil profile in a vegetable field [J]. Applied Soil Ecology, 2020,146: 103368.
- [21] Liu Y Y, Liu C X, Nelson W C, et al. Effect of water chemistry and hydrodynamics on nitrogen transformation activity and microbial community functional potential in hyporheic zone sediment columns [J]. Environmental Science & Technology, 2017,51(9):4877-4886.
- [22] 何 泽,张 敏,宁 卓,等.区域地下水环境演化的分子生物学特征-以太行山前平原浅层水为例 [J]. 中国环境科学, 2019,39(8): 3484-3492.
- He Z, Zhang M, Ning Z, et al. The environmental evolution research of regional groundwater using molecular biotechnologies: a case from the shallow groundwater in front of the Taihang Mountains [J]. China Environmental Science, 2019,39(8):3484-3492.
- [23] 杨志新,郑大玮,冯圣东.北京市农田生产的负外部效应价值评价 [J]. 中国环境科学, 2007,37(1):29-33.
- Yang Z X, Zheng D W, Feng S D. Value evaluation of negative external effect in Beijing City farmland production [J]. China Environmental Science, 2007,37(1):29-33.
- [24] 蓝天杉.北京通州区浅层地下水中“三氮”迁移转化与弱透水层阻滞作用研究 [D]. 长春:吉林大学, 2019.
- Lan T S. The transportation and transformation of "three nitrogen" in shallow groundwater and the retarding effect of aquitard in Tongzhou, Beijing [D]. Changchun: Jilin University, 2019.
- [25] 王朱珺,王 尚,刘洋荧,等.宏基因组技术在氮循环功能微生物分子检测研究中的应用 [J]. 生物技术通报, 2018,34(1):1-14.
- Wang Z J, Wang S, Liu Y Y, et al. The applications of metagenomics in the detection of environmental microbes involving in nitrogen cycle [J]. Biotechnology Bulletin, 2018,34(1):1-14.
- [26] 李 翔,杨天学,白顺果,等.地下水位波动对包气带中氮素运移影响规律的研究 [J]. 农业环境科学学报, 2013,32(12):2443-2450.
- Li X, Yang T X, Bai S G, et al. The Effects of Groundwater Table Fluctuation on Nitrogen Migration in Aeration Zone [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2013,32(12):2443-2450.
- [27] 董 佩,李 阳,孙 颖,等.包气带黏性土层对氮素污染地下水的防污性能试验研究 [J]. 现代地质, 2016,30(3):688-694.
- Dong P, Li Y, Sun Y, et al. Experimental Study on the filtration capability of clayey soils in the vadose zone prevention nitrogen from pollution groundwater [J]. Geoscience, 2016,30(3):688-694.

作者简介: 刘 鑫(1988-),女,吉林白城人,北京师范大学博士研究生,主要从事地下水污染防治与修复.发表论文 9 篇.