

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2018.05.001

污水灌溉区土壤非饱和带氮分布特征

王锦国,刘子辉,李伟健

(河海大学地球科学与工程学院,江苏 南京 211100)

摘要:以徐州市铜山区奎河段两岸的农业灌溉区为例,结合当地典型的 4 种不同种植方式,对非饱和带土壤中的硝酸盐氮和铵氮质量比及其分布特征进行分析。结果表明:土壤中硝酸盐氮质量比为 3.8~128.1 mg/kg(平均 33.0 mg/kg),铵氮质量比为 2.3~5.7 mg/kg(平均 3.8 mg/kg);非饱和带土壤中氮主要来自常年施肥和污水灌溉;由于不同种植方式具有不同的施肥和灌溉条件,因此土壤中氮的分布亦不同;在接受地表灌溉和施肥补给之后,硝酸盐氮主要以下渗迁移为主;铵氮在下渗过程中会产生吸附作用,其质量比与土壤中黏土颗粒的含量呈一定的相关性,但在常年灌溉的水稻-冬菜种植点,在表层土中尽管黏土颗粒含量不高,铵氮质量比仍然较高。

关键词:非饱和带;氮分布;硝酸盐氮;铵氮;降雨入渗;污水灌溉区;奎河

中图分类号:X53 **文献标志码:**A **文章编号:**1000-1980(2018)05-0377-07

Distribution characteristics of nitrogen in the unsaturated soil of sewage irrigation area

WANG Jinguo, LIU Zihui, LI Weijian

(School of Earth Science and Engineering, Hohai University, Nanjing 211100, China)

Abstract: The content and distribution of nitrate and ammonium in the unsaturated soil were analyzed in this study, considering four kinds of typical planting patterns on both sides of the agricultural irrigation area of Kuihe River in Tongshan District of Xuzhou City. The analysis results of the soil leaching liquor, which was obtained from the situ soil sample, show that the content of nitrate vary from 3.8 to 128.1 mg/kg with an average of 33.0 mg/kg and the content of ammonium vary from 2.3 to 5.7 mg/kg with an average of 3.8 mg/kg. The annual fertilization and sewage irrigation is the main source of nitrogen in the unsaturated soil. Meanwhile, the distribution of nitrogen in the soil is controlled by the condition of fertilization and irrigation for different planting patterns. Furthermore, the nitrogen is recharged by the surface irrigation and fertilizer, and mainly migrates in the direction of down-gradient of soil column. The ammonium is absorbed in the process of infiltration and as a general rule, the content of ammonium is related to the number of clay particles. However, the content of ammonium is still at a high level in the planting area of rice and cabbage with annual irrigation, even though the number of clay particles is small near the soil surface.

Key words: unsaturated zone; nitrogen distribution; nitrate; ammonium; infiltration; sewage irrigation area; Kuihe River

由不当灌溉和施肥方式引起的污染物在土壤中的积累,及污染物对地下水造成的污染已成为备受关注的问题。据有关资料统计,中国耕地仅占世界耕地的 7%,但化肥施用量却占了世界的 25%,是世界上单位面积化肥使用量最多的国家之一。我国化肥利用率较低,作物对氮肥的吸收只占施氮量的 30%~40%,其

基金项目: 国家自然科学基金(41572209);国家重点研发计划(2016YFC0401801);江苏省“六大人才高峰”项目(2014-JY-001)

作者简介: 王锦国(1974—),男,教授,博士,主要从事地下水运动与模拟研究。E-mail:wang_jinguo@hhu.edu.cn

引用本文: 王锦国,刘子辉,李伟健. 污水灌溉区土壤非饱和带氮分布特征[J]. 河海大学学报(自然科学版),2018,46(5):377-383.

WANG Jinguo, LIU Zihui, LI Weijian. Distribution characteristics of nitrogen in the unsaturated soil of sewage irrigation area[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences),2018,46(5):377-383.

余绝大部分或滞留于土壤中,或被农田排水和地表径流排入地下及地表水体,另有部分直接以挥发的形式返回大气。

非饱和带是水和污染物从地表进入地下水中的必经途径,目前已有许多研究开始关注水和污染物在非饱和带的运移机理^[1-2]。Zhao等^[3]经过研究发现农业灌溉区土壤中氮的来源包括化肥、生活污水,人畜粪肥、土壤有机氮等,随着降雨、灌溉入渗,氨氮和硝酸盐氮可以从土壤中进入地下水^[3-5]。对于氮在非饱和带土壤和水中的循环过程,国内外大部分科学工作主要围绕着氮的转换、淋滤2个方面,研究对地下水污染的程度^[6-8]。近年来,Sally等^[9]开始研究氮对非饱和带(水和土壤)污染的影响。Aulakh等^[10]发现在含水量较大、通气性较差的具有浅层地下水位的气带,通常可能发生反硝化反应;但在干旱和半干旱地区的研究发现,在气带中硝酸盐衰减很少,硝酸盐通常通过气带进入含水层^[11-12]。在农业灌溉区,由于持续施肥、灌溉(污灌)等,在非饱和带和地下水中,氮不断得到补充,同时存在各种化学反应,在非饱和带中硝酸盐运移还没有被很好地理解。对于铵(NH₄⁺)在非饱和带中运移的研究还比较少。

江苏省全省化肥投入量目前已达到336 kg/hm²,每公顷施纯氮300 kg左右(2003年统计结果),因此,笔者选择江苏省徐州市的奎河两岸为研究区域。研究区是当地的主要农业区,种植方式多样,主要有水稻、小麦、大棚蔬菜等。该地区长期采用奎河水进行灌溉,同时长期施用粪肥、化肥,土壤和浅层地下水已受到了较为严重的污染。特别是奎河水接受了来自上游徐州市的排污,因此污染较为严重,主要为氨氮、总氮、磷等超标。近年来已有很多学者关注该地区浅层地下水氮污染问题^[13-14],但对于土壤非饱和带中氮迁移和分布研究还较少。笔者对奎河两岸不同利用方式的土壤非饱和带中的硝酸盐氮和铵氮进行了调查,分析该地区土壤非饱和带中氮在剖面上的分布特征及成因。

1 研究区位置及采样分析

1.1 研究区位置

研究区位于江苏省徐州市境内的三堡镇奎河段,东经117°12′、北纬34°04′~34°08′之间。地势开阔平坦,海拔标高30 m左右。为了灌溉需要,在奎河黄桥附近设置了一个水闸。根据种植作物的不同,选择4种不同利用方式的土壤作为研究对象,分别是水稻-小麦轮作田(黄桥闸奎河西侧)、蔬菜地(徐村奎河东侧)、水稻-冬菜轮作田(石桥村奎河西侧)、河漫滩(石桥村奎河西侧),位置见图1。采样点位于平原河网区,总体上由地下水补给河水,地下水位平缓,地下水水力坡降1/3000。采样点距奎河最大距离200 m,地下水位与河水位接近。采用微水试验在两岸钻孔进行的渗透试验结果显示,含水土体渗透系数在1.13×10⁻⁴~5.10×10⁻⁴ cm/s之间,地下水渗流速度极其缓慢。

1.2 采样及分析方法

采样于2011年3月6日进行,采样之前(2月底)当地有降一次小雪。在选取的采样点开挖1.0 m×1.0 m的方形试坑(图2),在试坑壁上采用水平钻孔的方法在每个设计埋深点采集土样,水平钻孔钻进10 cm后采集土样。每个设计埋深点在剖面上的埋深自上而下分别为:0 cm(地表)、10 cm、20 cm、30 cm、40 cm、50 cm、80 cm、100 cm、120 cm、150 cm、200 cm和250 cm(其中水稻-小麦轮作田采样点250 cm处的设计埋深点塌孔,没有取得土样)。每个点取土样500 g,取样后立即将土样密封于聚乙烯保鲜袋中。采样的同时还在原位进行了土壤含水量测试。土壤含水量测试采用MPM-160B型手持式土壤水分采集仪,包括土壤水分探头、土壤水分读数仪。水分探头为3根6 cm长不锈钢探针,圆柱式防水探头,可长期埋设于土壤中使用;可测量土壤体积分含

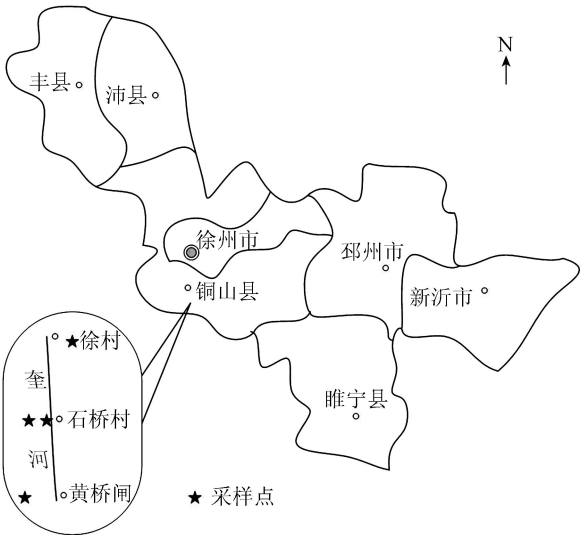


图1 研究区采样点位置示意图

Fig.1 Sketch map of sampling points in the study area



图2 现场采样照片

Fig.2 Picture of field sampling

水量(%),测量精度 $\pm 2\%$ 。

土样中的土壤颗粒含量测定采用密度计法(比重计法),试验仪器采用乙种密度计,刻度单位为 20 ℃ 时悬液的比重相对密度 0. 995 ~ 1. 050,最小分度为 0. 001,精度为 0. 0002。土壤颗粒分级根据中国土壤质地分级标准,砂粒: $d>0. 02\text{ mm}$,粉粒: $0. 002\text{ mm}<d<0. 02\text{ mm}$,黏粒: $d<0. 002\text{ mm}$ 。

土壤中无机氮的浸提:称 10 g 土样置于 250 mL 的广口瓶内,加入 KCl 溶液(浓度为 2. 0 mol/L) 100 mL,塞紧瓶塞,置于振荡器上振荡 1h。静止直至土壤-KCl 悬浮液澄清(一般约 30 min),取一定量的上清液立即进行分析。通过浸提获得的是土壤中水溶态和交换态的无机氮,其中交换态是指可以被中性盐溶液(如 KCl) 交换提取的部分。

浸提液中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 测试采用 USEPA 的纳氏试剂法^[15],测试精度为 1. 0% ,测试仪器采用美国哈希公司的 DR2800 型可见分光光度仪,检测下限为 0. 02 mg/L。 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 测试采用荷兰 Skalar San++ 连续流动分析仪。

2 结果分析

2.1 非饱和带土壤中氮分布特征

2.1.1 小麦-水稻轮作田

采样点剖面位于奎河黄桥闸西侧,距离河岸 200m,采样时附近土地种植小麦,地下水位埋深 2. 38 m。该地块每年 6 月中旬至 10 月上旬种植水稻,10 月下旬至次年 6 月上旬种植小麦。种植水稻期间施肥情况:插秧一周后施肥(尿素+磷酸二氨或复合肥),7 月 20 日左右施用尿胺为水稻抽穗准备。种植小麦期间施肥情况:10 月 20 日左右种小麦,施底肥(尿素+磷酸二氨),11 月底施少量尿素,同时进行一次灌溉;次年 2 月中旬进行一次灌溉,3 月施尿素+磷酸二氨或复合肥,配合小麦抽穗。

图 3 为土壤体积含水量、 $w(\text{NO}_3^-\text{-N})$ 、 $w(\text{NH}_4^+\text{-N})$ 在非饱和带变化情况。取样前当地下了一次小雪,因此土壤体积含水量总体较大,体积含水量为 34. 2% ~ 42. 9%。0 ~ 30 cm 土层中, $w(\text{NO}_3^-\text{-N})$ 随埋深增加而增大。由于降雪雪水下渗,在淋滤作用下,表层土中的 NO_3^- 向下运移,因此 $w(\text{NO}_3^-\text{-N})$ 呈向下增加的趋势。研究表明,当潜水面埋藏较浅、土壤潮湿、透气性差或非饱和带颗粒粗细相间、土壤水含氧量较小时,最有利于反硝化作用的进行,此时地下水中硝态氮将被逐步还原^[9]。研究区表层主要为粉质壤土,地表降雪后土壤含水量大,有利于反硝化作用的进行。埋深 30 ~ 120 cm 处 $w(\text{NO}_3^-\text{-N})$ 相对上下层土壤中较大,主要原因是前一次施肥后的 NO_3^- 随降水入渗,在该段相对富集;120 cm 以下 $w(\text{NO}_3^-\text{-N})$ 则开始随埋深减小。

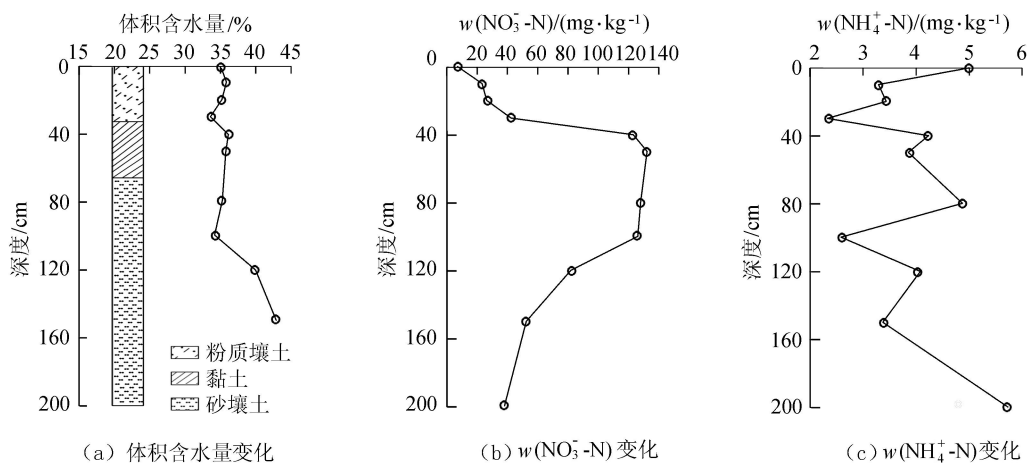


图 3 水稻-小麦轮作田土壤非饱和带氮含量随深度变化

Fig. 3 Variation of nitrogen content in the unsaturated zone of rice and wheat rotation field with depth

测点附近的小麦地中,在 2010 年 11 月底施了一次尿素($\text{CO}(\text{NH}_2)_2$),之后该地区一直没有降水,直到取样前有一次有效降雪。降水入渗对尿素水解物(碳酸铵或碳酸氢铵) 进行了溶解并下渗,使 $w(\text{NH}_4^+\text{-N})$ 从表层到土层深度 30 cm 逐渐减小。土壤对 NH_4^+ 具有很强的吸附性,特别是黏性土含量较高的土壤。30 cm 土层以下 $w(\text{NH}_4^+\text{-N})$ 为 2. 33 ~ 5. 74 mg/kg,变化相对较小。

2.1.2 蔬菜地

位于奎河东侧徐村附近,距离河岸 120 m,取样点南侧种植蔬菜,主要施粪肥和复合肥,采用奎河水灌溉。取样时地下水位埋深 2.96 m。土壤体积含水量总体较大,仅在地表 10 cm 以上含水量小于 30% (图 4 (a))。由图 4(b)可知,0~50 cm 范围内, $w(\text{NO}_3^- \text{-N})$ 随埋深增加而增加,由于该处菜地施肥采用粪肥为主,50 cm 以上有一层黏土相隔,因此 NO_3^- 具有由地表向下积累的趋势。在 50~150 cm 埋深段 $w(\text{NO}_3^- \text{-N})$ 有减小的趋势,由于上部黏土层的阻隔作用, NO_3^- 无法顺利补给,因此 $w(\text{NO}_3^- \text{-N})$ 逐渐减小,最后在 150 cm 以下趋于稳定。由图 4(c)可知,120 cm 埋深以上部分, $w(\text{NH}_4^+ \text{-N})$ 变化幅度较大,但平均相对稳定,与持续的河水灌溉和施肥有关,非饱和带有较连续的 NH_4^+ 来源。

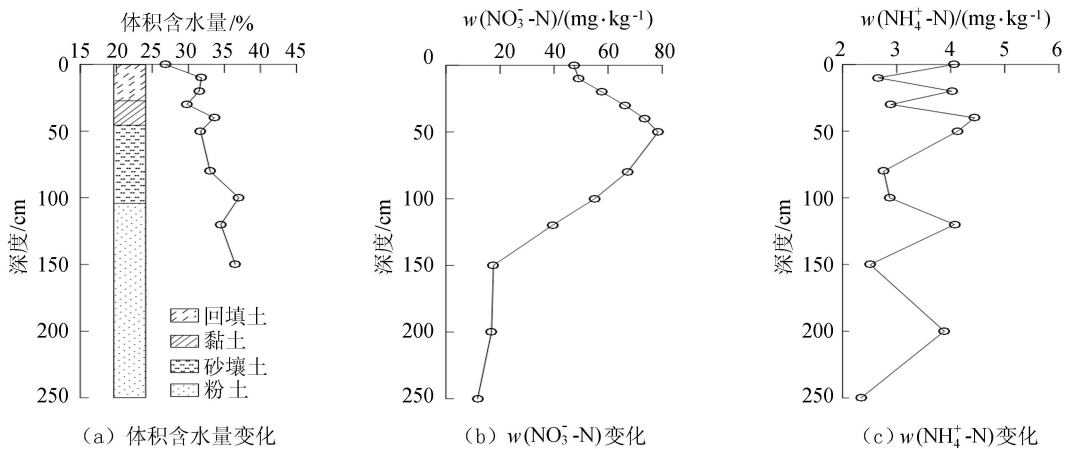


图4 蔬菜地土壤非饱和带氮含量随深度变化

Fig.4 Variation of nitrogen content in the unsaturated zone of vegetable field with depth

2.1.3 水稻-冬菜轮作田

取样点位于石桥村附近的田边,距离河岸 100 m,该测点附近的田一年种植两季,分别是水稻和冬菜。每年6月中旬至10月上旬种植水稻,10月下旬至次年5月上旬种植冬菜。冬菜施肥:磷酸二氨、尿素。水稻施肥方式:插秧一周后施肥(尿素+磷酸二氨或复合肥),7月20日左右施用尿胺。采样点由于种植水稻和冬菜,常年灌溉,因此土壤体积含水量很高(图5),采样时地下水位埋深2.14m。

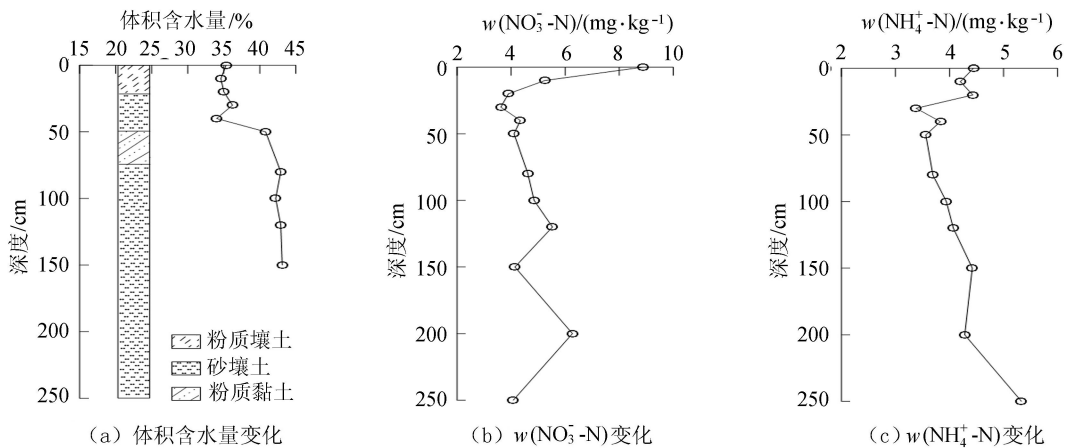


图5 水稻冬菜地土壤非饱和带氮含量随深度变化

Fig.5 Variation of nitrogen content in the unsaturated zone of rice and cabbage field with depth

该剖面土壤中 $w(\text{NO}_3^- \text{-N})$ 总体较低。由于采样期间附近种植冬菜,采用河水浇灌较多,因此表层土壤中 $w(\text{NO}_3^- \text{-N})$ 较高,20 cm 以下开始趋于稳定。由于该采样点地势较低,大多数时间地下水位埋深很浅,一般埋藏深度在 80 cm 左右,最浅曾达 40 cm,因此土壤剖面长期浸泡在水中,即非饱和带较薄。由于 2010 年 11 月以后该地区一直没有降雨,该处地下水埋深在 2010 年 11 月 27 日至 2011 年 3 月 1 日期间大于 2.5 m,其他时间段埋深均较小。当潜水面埋藏较浅、土壤潮湿、透气性差或非饱和带颗粒粗细相间、土壤水含氧量较小

时,有利于反硝化作用的进行,因此该剖面土壤 $w(\text{NO}_3\text{-N})$ 总体较低。

整个剖面上 $w(\text{NH}_4\text{-N})$ 变化不大。水稻为喜铵植物,在水稻种植期间,大量使用铵肥,并不断有河水灌溉,土壤长期接受 NH_4^+ 的输入,使 $w(\text{NH}_4\text{-N})$ 保持了一定水平。

2.1.4 河漫滩

取样点位于石桥村附近奎河河漫滩上,附近种植杨树。该处奎河水中 $\rho(\text{NO}_3\text{-N})$ 、 $\rho(\text{NH}_4\text{-N})$ 分别为 1.74 mg/L、11.20 mg/L。观测取样时地下水位埋深 2.61 m。图 6 为非饱和带剖面 $w(\text{NO}_3\text{-N})$ 、 $w(\text{NH}_4\text{-N})$ 变化曲线。0~50 cm 埋深处 $w(\text{NO}_3\text{-N})$ 总体较小;80~120 cm 埋深段 $w(\text{NO}_3\text{-N})$ 相对增大,该段为河水位上下波动带。0~120 cm 埋深的土层中 $w(\text{NH}_4\text{-N})$ 变化较小。由于地下水与河水的直接联系,在地下水位变幅范围内,该处河水中的 NH_4^+ 被土壤吸附,在 NH_4^+ 来源充足的情况下,土壤中的 NH_4^+ 保持了一定的量。

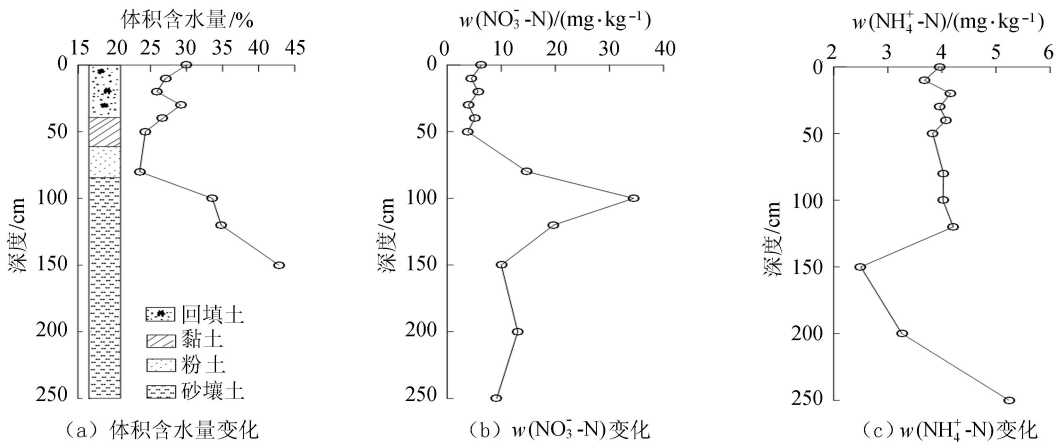


图 6 河漫滩土壤非饱和带氮含量随深度变化

Fig. 6 Variation of nitrogen content in the unsaturated zone of floodplain with depth

2.2 对比分析

对比 4 种不同土地利用方式的土壤中氮的含量,将剖面上的 $w(\text{NO}_3\text{-N})$ 和 $w(\text{NH}_4\text{-N})$ 分别取平均值,列于表 1。土壤中 $w(\text{NO}_3\text{-N})$ 由高到低依次为小麦-水稻轮作田、蔬菜地、河漫滩、水稻-冬菜轮作田。小麦为喜硝态氮的植物,施肥时硝态氮肥使用相对较多,取样时段土壤中 $w(\text{NO}_3\text{-N})$ 最高;蔬菜大棚地一年四季种植蔬菜,常常需要灌溉和施肥(复合肥和粪肥),因此土壤中 $w(\text{NO}_3\text{-N})$ 也较高;水稻-冬菜轮作田中,夏季水稻主要施用铵肥,冬菜也以施用铵肥为主,因此 $w(\text{NO}_3\text{-N})$ 最低;河漫滩附近土壤长期受污染河水的影响,土壤中 $w(\text{NO}_3\text{-N})$ 主要受河水控制。从差异显著性分析也可以看出,4 种不同土地利用方式的土壤中硝酸盐氮含量有显著差异。

$w(\text{NH}_4\text{-N})$ 在不同利用方式土壤中相差不大,水稻-冬菜轮作田略高,是由于水稻和冬菜都是采用河水灌溉较多,同时施肥时使用了相对较多的铵肥。一般情况下,水稻是喜铵的作物,施用铵态氮肥的效果比硝态氮肥好(硝态氮肥没有硝酸还原酶、同时硝态氮容易淋失和反硝化),而旱田以硝态氮肥为主,作物吸收硝态氮多于铵态氮,如小麦等。在水稻-冬菜轮作田、小麦-水稻轮作田中,施用了大量的铵态氮肥。总体上 4 种不同土地利用方式的铵氮含量在剖面上的平均值差异不显著。

在对应 3 处土壤采样点还对地下水中氮含量进行了测试,结果见表 1。小麦-水稻轮作田测点位于黄桥闸剖面,地下水位埋深 0.6~3.1 m,降雪后地下水位上升幅度较大,通常情况下埋深大于 1 m。从表 1 中可以

表 1 非饱和土壤与地下水中氮含量的比较

Table 1 Comparison of the nitrogen content between unsaturated soil and groundwater

采样点	地下水/(mg·L ⁻¹)		土壤/(mg·kg ⁻¹)	
	$\rho(\text{NO}_3\text{-N})$	$\rho(\text{NH}_4\text{-N})$	$w(\text{NO}_3\text{-N})$	$w(\text{NH}_4\text{-N})$
小麦-水稻轮作田	9.13	0.67	71.10 ^a	3.89 ^a
河漫滩	0.78	0.45	10.89 ^{cd}	3.91 ^a
水稻-冬菜轮作田	2.24	0.28	4.97 ^d	4.13 ^a
蔬菜地			48.33 ^b	3.39 ^a

注:黄桥闸、石桥河水的 $\rho(\text{NO}_3\text{-N})$ 分别为 4.76 mg/L、1.74 mg/L, $\rho(\text{NH}_4\text{-N})$ 分别为 7.28 mg/L、11.2 mg/L;多重比较采用最小显著差数法,有相同字母者差异不显著($P<0.05$),如 4 种不同土地利用方式的铵氮含量数据上标均为 a,表示差异不显著。

看出,该处土壤中 $w(\text{NO}_3^- \text{-N})$ 最高,由于采样时间为 2011 年 3 月,冬小麦刚进行了施肥和灌溉(小麦施肥以硝酸盐氮为主),因此土壤中 $w(\text{NO}_3^- \text{-N})$ 最高,同时地下水中的 $\rho(\text{NO}_3^- \text{-N})$ 也最高, $\rho(\text{NH}_4^+ \text{-N})$ 相对较高。

水稻-冬菜测点处地势较低,地下水位埋深很浅,深度在 80 cm 左右,最浅曾达 40 cm,因此土壤剖面长期浸泡在水中。土壤和地下水中 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 含量相对较低。由于水稻和冬菜地多施用铵态氮肥以及粪肥,土壤中 $w(\text{NH}_4^+ \text{-N})$ 相对较高。

河漫滩测点位于石桥断面河漫滩上,该处地势相对较高,地下水埋深约 2.0 ~ 3.2 m。该观测井处无作物,也无直接的肥料等从地面进入,同时从水位观测值看,地下水与河水基本持平,该处主要反映了河水对地下水的影响。从表 1 可以看出,地下水中的 $\rho(\text{NO}_3^- \text{-N})$ 、 $\rho(\text{NH}_4^+ \text{-N})$ 均小于河水,且 $\rho(\text{NH}_4^+ \text{-N})$ 远小于河水。地下水中的 NO_3^- 来源于河水;同时地下水中的 NO_3^- 也可能来自于土壤有机氮的转化。

土壤中的黏土颗粒对 NH_4^+ 具有很强的吸附性,因此土壤中 $w(\text{NH}_4^+ \text{-N})$ 应与土壤中黏粒的含量有关。采用密度计法对土壤颗粒含量进行分析,结果见表 2。不同土质段 $w(\text{NH}_4^+ \text{-N})$ 的平均值与土壤黏粒含量的关系曲线如图 7 所示。从图 7 可以发现,总体上二者相关性较好,相关系数为 0.672 ($P < 0.005$),土壤中 $w(\text{NH}_4^+ \text{-N})$ 随黏土颗粒含量的增加而增加。但在水稻-冬菜种植点由于采用河水灌溉较多,因此在表层土中尽管黏土颗粒含量不高(19%),但 $w(\text{NH}_4^+ \text{-N})$ 仍较高(4.32 mg/kg)。

表 2 土壤颗粒含量及土质分类

Table 2 Soil particle content and soil classification

土地利用方式	粉粒质量分数/%	黏粒质量分数/%	砂粒质量分数/%	$w(\text{NH}_4^+ \text{-N})$ 平均值/($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	埋深/cm
小麦-水稻轮作	72.0	12.0	16.0	3.66	0 ~ 32
	51.2	35.8	13.0	4.05	32 ~ 65
	64.3	6.9	28.8	3.73	65 ~ 200
蔬菜地	79.3	8.6	12.1	3.58	0 ~ 27
	50.5	34.0	15.5	3.87	27 ~ 45
	35.3	0.0	64.7	3.25	45 ~ 105
	98.5	1.5	0.0	3.29	105 ~ 250
水稻-冬菜轮作	73.1	19.0	7.9	4.32	0 ~ 22
	67.3	5.5	27.2	3.80	22 ~ 50
	73.1	10.1	16.8	3.63	50 ~ 75
	71.7	8.8	19.5	3.90	75 ~ 250
河漫滩	77.4	13.9	8.7	3.94	0 ~ 40
	50.0	36.8	13.2	4.08	40 ~ 60
	76.2	7.0	16.8	3.83	60 ~ 85
	70.8	12.2	17.0	3.60	85 ~ 250

3 结 语

不同的施肥和灌溉条件会对非饱和带土壤中铵氮和硝酸盐氮的分布产生较大影响。污水灌溉区非饱和土壤中硝酸盐氮和铵氮的分布主要受灌溉和施肥的影响较大,其中硝酸盐氮接受补给后以下渗迁移为主;铵氮在下渗过程中产生了吸附作用,其含量与土壤中黏土颗粒的含量呈一定的相关性,但在常年灌溉的水稻-冬菜轮作种植点,在表层土中尽管黏土颗粒含量不高,铵氮仍有较高的含量。不同形态的氮随着水的下渗已对地下水产生了污染,特别是铵氮,不仅影响水质,去除也相当困难,应是今后重点关注的问题。

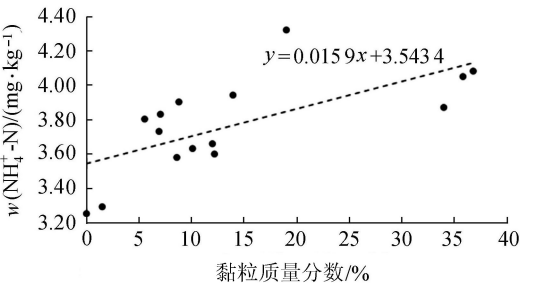


图 7 非饱和土壤中 $w(\text{NH}_4^+ \text{-N})$ 与黏粒含量的关系
Fig. 7 Relationship between $w(\text{NH}_4^+ \text{-N})$ and the content of clay in unsaturated soil

参考文献:

[1] HARTER T, ONSOY Y S, HEEREN K, et al. Deep vadose zone hydrology demonstrates fate of nitrate in eastern San Joaquin Valley[J]. California Agriculture, 2005, 59(2):125-132.

[2] YUAN L, PANG Z, HUANG T. Integrated assessment on groundwater nitrate by unsaturated zone probing and aquifer sampling with environmental tracers[J]. Environmental Pollution, 2012, 171(4):226-233.

[3] ZHAO Bingzi, ZHANG Jiabao, FLURY M, et al. Groundwater contamination with NO₃-N in a wheat-corn cropping system in the North China Plain[J]. Pedosphere, 2007, 17(6):721-731.

[4] NOLAN B T. Nitrate behavior in ground waters of the southeastern USA[J]. Journal of Environmental Quality, 1999, 28:1518-1527.

[5] 潘田, 张幼宽. 太湖流域长兴县浅层地下水氮污染特征及影响因素研究[J]. 水文地质工程地质, 2014, 41(5):131-137. (PAN Tian, ZHANG Youkuan. A study of nitrogen pollution in shallow groundwater and its affecting factors in Changxing County in the Taihu Basin[J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 2014, 41(5):131-137. (in Chinese))

[6] ELISANTE E, MUZUKA A N N. Occurrence of nitrate in Tanzanian groundwater aquifers: a review[J]. Applied Water Science, 2017, 7:1-17.

[7] CHEN J, TANG C, SAKURA Y, et al. Nitrate pollution from agriculture in different hydrogeological zones of the regional groundwater flow system in the North China Plain[J]. Hydrogeology Journal, 2005, 13(3):481-492.

[8] 裴亮, 张体彬, 梁晶, 等. 再生水滴灌土壤中氮素的动态变化规律[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2013, 41(1):70-74. (PEI Liang, ZHANG Tibin, LIANG Jing, et al. Dynamic variation of nitrogen in soil under reclaimed water drip irrigation [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2013, 41(1):70-74. (in Chinese))

[9] SALLY P, DAVID W, ROBERT S, et al. Net exchange of greenhouse gases from soils in an unimproved pasture and regenerating indigenous Kunzea ericoides shrubland in New Zealand[J]. Australian Journal of Soil Research, 2010, 48(5):385-394.

[10] AULAKH M S, KHERA T S, DORAN J W. Mineralization and denitrification in upland, nearly saturated and flooded subtropical soil. II. Effect of organic manures varying in N content and C : N ratio[J]. Biology & Fertility of Soils, 2000, 31(2):168-174.

[11] GREEN C T, FISHER L H, BEKINS B A. Nitrogen fluxes through unsaturated zones in five agricultural settings across the United States[J]. Journal of Environmental Quality, 2008, 37(3):1073-1085.

[12] 贺国平, 刘培斌, 慕星, 等. 永定河冲洪积扇地下水中硝酸盐来源的同位素识别[J]. 水利学报, 2016, 47(4):582-588. (HE Guoping, LIU Peibin, MU Xing, et al. Identification of nitrate sources in groundwater in the Yongding River alluvial fan with isotope technology[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2016, 47(4):582-588. (in Chinese))

[13] 王锦国, 李群, 王碧莹, 等. 奎河两岸污灌区浅层地下水氮污染特征及同位素示踪分析[J]. 长江科学院院报, 2017, 34(4):15-19. (WANG Jinguo, LI Qun, WANG Biying, et al. Characteristics of nitrogen pollution and isotopic tracer analysis of shallow groundwater in the sewage irrigation area of Kuihe River[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2017, 34(4):15-19. (in Chinese))

[14] 钱进, 王超, 王沛芳, 等. 河岸带表土层氮素非饱和入渗运移规律模拟[J]. 水科学进展, 2011, 22(4):568-573. (QIAN Jin, WANG Chao, WANG Peifang, et al. Simulation of nitrogen infiltration and movement through unsaturated soil in topsoil layer of riparian zone[J]. Advances in Water Science, 2011, 22(4):568-573. (in Chinese))

[15] 哈希公司. 水质分析手册[M]. 5 版. 北京: 化学工业出版社, 2009.

(收稿日期:2017 -06 -18 编辑:刘晓艳)