植物营养与肥料学报 2012,18(3):637-644
Plant Nutrition and Fertilizer Science

武汉市城郊区集约化露天菜地生产系统硝态氮淋溶迁移规律研究

崔敏[1],胡承孝[1*],Di Hong Jie[2],孙学成[1],谭启玲[1],张木[1]
(1 华中农业大学微量元素研究中心,华中农业大学资源与环境学院,
农业部亚热带农业资源与环境重点开放实验室,湖北武汉 430070;
2 Center for Soil and Environment Research, Lincoln University, Lincoln 7647, Christchurch, New Zealand)

摘要: 以武汉市及其周边区域的典型露天菜地为研究对象,对菜地土壤、土壤溶液及菜地附近井水中硝态氮(NO_3^--N)含量进行了周年监测分析。结果表明,菜地土壤 100 cm 内各土层 NO_3^--N 平均含量为 11.2 mg/kg,其中 0—20 cm 土壤剖面 NO_3^--N 含量为 21.1 mg/kg; 60 cm 深度处土壤溶液中 NO_3^--N 含量为 27.5 mg/L; 井水中 NO_3^--N含量为 19.6 ~ 39.8 mg/L,其含量是饮用水安全标准的 2 ~ 4 倍。由此说明,武汉城郊菜地土壤NO_3^--N淋失量较大,已造成地下水 NO_3^--N 污染; 且硝酸盐淋失量随着氮肥施用量和水分输入量的增加而增大,与种植蔬菜的种类有一定相关关系; 由于土壤理化性质不同,土壤硝酸盐含量在正常范围内并且尚能够安全种植作物时,地下水可能已受到严重的污染,这种情况在砂性土壤中表现更为明显。本文的研究为科学评价露天菜地土壤和地下水 NO_3^--N 污染提供了科学理论依据。

关键词: 硝态氮; 菜地; 氮素淋失; 地下水污染
中图分类号: S153.6; S606+1　　**文献标识码:** A　　**文章编号:** 1008-505X(2012)03-0637-08

Leaching and transport of nitrate in vegetable production systems in suburbs of Wuhan

CUI Min[1], HU Cheng-xiao[1*], DI Hong-jie[2], SUN Xue-cheng[1], TAN Qi-ling[1], ZHANG Mu[1]
(*1 Microelement Research Centre, College of Resources and Environmental Sciences, Huazhong Agricultural University/ Key Laboratory of Subtropical Agricultural Resources and Environment, Ministry of Agriculture, Wuhan, Hubei 430070, China; 2 Center for Soil and Environment Research, Lincoln University, Lincoln 7647, Christchurch, New Zealand*)

Abstract: The nitrate(NO_3^-) contents of vegetable field soil, soil solution and well water were annually determined in suburbs of Wuhan, where are the typical open-air vegetable production systems. The results show that the average NO_3^--N content in 0-100 cm soil is 11.2 mg/kg and the content in 0-20 cm soil is 21.1 mg/kg. The NO_3^- content in soil solution at 60 cm depth is 27.5 mg/L, and the NO_3^--N concentrations in well water are from 19.6 to 39.8 mg/L. These results indicate that the nitrate leaching loss is serious in the vegetable soil, and the NO_3^--N content in well water is far more than the safe standard for drinking water. The amount of nitrate leaching loss has a direct relationship to the amount of nitrogen fertilizer and water input, the growth situation of vegetable crops and soil particle composition. Due to different soils have different particle composition, especially for the sandy soil, the groundwater may have suffered serious nitrate pollution although the crops could grow normally. This study could make contributions to scientific evaluation of the nitrate pollution of open-air vegetable field soil and groundwater.

收稿日期: 2011-08-04　　**接受日期:** 2012-01-18
基金项目: 农业部引进国际先进农业科学技术(948)项目(2008-Z25);国家"十一五"科技支撑计划项目(2008BADA7B03)资助。
作者简介: 崔敏(1983—),男,河南驻马店人,博士研究生,主要从事菜田土壤氮素损失及其调控和微生物变化规律方面的研究。
E-mail: hzcmin@yahoo.cn。　*通讯作者 Tel: 027-87282043, E-mail: hucx@mail.hzau.edu.cn

Key words: nitrate nitrogen; vegetable field; nitrogen leaching; underground water pollution

近几十年,许多地方把蔬菜生产作为调整农业结构,发展农村经济的重点产业之一,我国蔬菜种植面积迅速增加,蔬菜生产正向集约化、专业化和区域化方向发展[1]。

蔬菜是喜氮(N)作物,为了追求更好的经济效益,菜农经常大量施用氮肥。调查显示,我国蔬菜生产中氮肥施用水平远远高于蔬菜作物本身对氮素的需求,北京郊区菜地施氮量达1741 kg/hm^2,是粮田的4.5倍[2],有些甚至高达3300 kg/hm^2[3]。调查发现,武汉市城郊蔬菜产区,全年连续2～6季种植蔬菜一般共投入纯氮达800～1600 kg/hm^2,最高达2400 kg/hm^2。

氮肥进入土壤后,经微生物硝化作用产生的硝酸根(NO_3^-),一部分被作物吸收,一部分累积在土壤中,或随土壤水下渗淋失而进入地下水。因此,过量施用氮素不仅不能进一步提高作物产量,反而会造成作物产量和品质的下降以及肥料利用率的降低和地下水体的硝态氮污染[4-7]。北京市郊菜田土壤剖面0—20 cm NO_3^--N含量为17.3 kg/hm^2,40—60 cm NO_3^--N含量仍高达17.7 kg/hm^2[8];上海市露天菜地土壤表层的NO_3^--N平均含量为111.52 mg/kg[9]。Power和Schepers的研究表明[10],农业浅层地下水NO_3^--N含量与氮肥施用量密切相关。北京郊区蔬菜地由于化学氮肥投入量超过一般农田,地下水中NO_3^--N含量高达13.9～27.2 mg/L[11];北京市平原农区43个保护地菜田浅层地下水NO_3^--N平均含量高达72.42 mg/L,超标率达100%[12];延安安塞日光温室下土层10 m处的地下水NO_3^--N含量最高可达142 mg/L[13];山东惠民温室蔬菜种植区15 m内浅层地下水NO_3^--N含量超标率为99%(N 10 mg/L)[14]。Zhao等[7]利用原状土柱系统的研究也表明,在华中地区菜地中,随着氮肥投入的增加,氮淋失量和地下水中NO_3^--N的浓度随之大幅度增加,对地下水造成了严重的污染。所以,大量施用氮肥首先导致土壤各层硝酸盐积累,进而造成蔬菜种植区域地下水NO_3^--N的严重污染[15]。

虽已有大量研究表明,城郊菜地生产系统中土壤和地下水因大量施用氮肥引发严重的NO_3^--N污染,但有关菜地系统土壤及土壤溶液、地下水NO_3^--N含量间的关系及其周年变化鲜有报道。本文以武汉市城郊区域典型露天菜地为研究对象,周年动态监测菜地土壤、土壤溶液、附近井水NO_3^--N含量,探讨城郊区典型集约化蔬菜种植区土壤及土壤溶液、地下水NO_3^--N积累的动态变化和相互关系,为城郊区控制蔬菜生产系统NO_3^--N污染和蔬菜高产、高效、优质、安全生产提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 区域选择

武汉市位于江汉平原东部,属亚热带湿润季风气候,雨量充沛、日照充足、四季分明。总体气候环境良好,近30年来,年均降水量1269 mm,且多集中在6～8月。年均气温15.8～17.5℃,年无霜期一般为211～272 d,年日照总时数1810～2100 h。

在湖北省武汉市洪山区及周边地区咸宁市嘉鱼县共选取了5个具有代表性的蔬菜种植基地,并进行GPS定位。其中试验点1和2为砂性土壤且距离较近,代表一个区域;试验点3、4和5为粘性土壤且距离较近,代表一个区域。各试验点位置及基本情况见表1,试验点100 cm土层内不同层次的土壤颗粒组成见表2。通过对各个试验点的调查得知,试验点1和2代表的区域在改为菜地的约40年中,

表1 试验点基本情况

Table 1 Introduction of the experiment sites

项目 Item	试验点 Trial site				
	1	2	3	4	5
地点 Address	武汉洪山区 Hongshan district, Wuhan city		咸宁市嘉鱼县 Jiayu country, Xianning city		
地龄 Cultivated years(a)	40		15		
面积 Area(hm^2)	0.25	0.32	0.30	0.30	0.25
经度 Longitude	E30°39′13.2″	E30°39′37.0″	E30°04′27.2″	E30°04′19.6″	E30°04′18.4″
纬度 Latitude	N114°29′40.5″	N114°29′33.8″	N114°06′07.1″	N114°05′27.6″	N114°06′10.2″

前 25 年施用动物粪便等有机肥料较多,年平均施氮肥量约为 400 ～700 kg/hm^2,后 15 年施用的氮素肥料以化学肥料为主,年平均施用氮肥量约为 650 ～900 kg/hm^2;试验点 3、4 和 5 代表的区域在改为菜地的约 15 年中,施用的氮素主要以化学肥料为主,年平均施氮肥量约为 500 ～700 kg/hm^2;在各试验点监测期间的种植情况、施肥时间和施肥量情况见表 3。

表 2　试验土壤 100 cm 内不同土层土壤颗粒组成(%)

Table 2　Tested soils particle composition of different soil layers in 100 cm

试验点 Trial site	土壤颗粒 Soil particle	土层 Soil layer(cm) 0—20	20—40	40—60	60—80	80—100
1	沙粒 Sand	42.7	29.5	32.6	54.9	57.8
	壤粒 Silt	47.5	56.2	60.2	34.6	35.2
	粘粒 Clay	9.8	14.3	7.2	10.5	7.0
2	沙粒 Sand	42.0	39.6	44.2	61.6	51.1
	壤粒 Silt	52.7	49.3	45.5	29.0	41.9
	粘粒 Clay	5.3	11.1	10.3	9.4	7.0
3	沙粒 Sand	23.9	11.7	8.7	2.3	1.6
	壤粒 Silt	64.0	68.6	64.8	67.4	77.5
	粘粒 Clay	12.1	19.7	26.5	30.3	20.9
4	沙粒 Sand	7.0	10.5	13.5	8.2	8.7
	壤粒 Silt	66.4	70.6	67.7	71.1	74.0
	粘粒 Clay	26.6	18.9	18.8	20.7	17.3
5	沙粒 Sand	14.9	9.6	8.2	8.6	9.3
	壤粒 Silt	62.6	62.6	60.1	60.2	64.2
	粘粒 Clay	22.5	27.8	31.7	31.2	26.5

表 3　试验点蔬菜种植及施肥情况

Table 3　Vegetable rotation, tillage practices, and fertilization of the fields

试验点 Trial site	种植情况 Vegetable rotation (y-m-d)	施肥时期 Date (y-m-d)	施肥量 Rates of fertilization (kg/hm^2)	氮肥施用量 N rates (kg/hm^2)
1	瓠子 Squash(2009-4-6 ～2009-8-10)	2009-04-03	CF(240-90-270)	
	萝卜 Radish(2009-9-2 ～2010-1-9)	2009-09-01	CF(240-90-270)	840
	萝卜 Radish(2010-1-5 ～2010-4-2)	2009-12-28	CF(360-135-405)	
2	萝卜 Radish(2009-2-20 ～2009-5-23)	2009-02-10	CF(240-90-270)	
	萝卜 Radish(2009-7-18 ～2009-9-29)	2009-07-10	CF(240-90-270)	720
	萝卜 Radish(2009-12-28 ～2010-4-15)	2009-12-20	CF(240-90-270)	
3	冬瓜 Wax gourd(2009-4-20 ～2009-8-25)	2009-04-10	CF(184-184-184)	
	甘蓝 Cabbage(2009-9-10 ～2010-3-12)	2009-05-10	CF(101-56-56)	534
		2009-09-05	CF(249-113-113)	
4	冬瓜 Wax gourd(2009-4-15 ～2009-8-24)	2009-04-10	CF(188-188-188)	502
	甘蓝 Cabbage(2009-9-10 ～2010-3-12)	2009-09-05	CF(315-225-225)	
5	辣椒 Pepper(2009-3-20 ～2009-8-12)	2009-03-18	CF(274-184-184)	612
	甘蓝 Cabbage(2009-9-6 ～2010-3-15)	2009-09-04	CF(338-225-225)	

注(Note): CF(×-×-×)—代表复合肥($N-P_2O_5-K_2O$)的施用量 Stands for the rates of compound fertilizers ($N-P_2O_5-K_2O$).

1.2 土壤样品的采集及土壤 NO_3^--N 含量测定

2009年4月至2010年3月,每月10号左右定期采取土壤样品。每个试验点每次选取3个点,并分为0—20 cm、20—40 cm、40—60 cm、60—80 cm和80—100 cm 5个层次,共15个样品;分别将各层土壤样品混匀,挑出杂物,装入自封袋内密封,放入保温冰盒保存并带回实验室,及时过5 mm筛。称取20 g左右新鲜土样于铝盒中,在105℃下烘干24 h,测定土壤含水量。称取10 g左右新鲜土样于振荡瓶中,按照5∶1的比例(浸提液∶土样)加入2 mol/L氯化钾溶液,在恒温(25℃)摇床上振荡1 h提取,过滤,用流动注射分析仪(FIAstar 5000,FOSS,丹麦)测定滤液 NO_3^--N 含量。

1.3 土壤溶液样品的采集及样品中 NO_3^--N 含量测定

采用吸压式土壤溶液取样器(Suction cup)吸取土壤溶液,取样器中PVC(型号为WS60,中国)管长60 cm,陶瓷头直径和长度分别为3 cm和7 cm,陶瓷头埋置60 cm深土层。

根据试验点的区域位置以及种植习惯和土壤类型不同,分别在试验点1和3埋置土壤溶液提取器,取样频率为每月一次,采样时间和采取土壤样品在同一天或相差一天进行。取样步骤:取样前一天,使用手动真空泵(型号为04000,美国)将PVC管抽为真空,以便通过负压使土壤溶液进入陶瓷头内,第二天从陶瓷头内抽取土壤溶液样品,然后保存在4℃条件下的试剂瓶中,带回实验室过滤后用流动注射分析仪(FIAstar 5000,FOSS,丹麦)测定滤液中的 NO_3^--N含量。

1.4 菜田附近井水样品的采集及样品中 NO_3^--N 含量测定

由于试验点1和2代表一个区域,试验点3、4和5代表另外一个区域,因此分别在试验点1和3各选取一口水井,在采取土壤样品的同时采集井水样品,保存在4℃条件下的试剂瓶中带回实验室,过滤后,用流动注射分析仪(FIAstar 5000,FOSS,丹麦)测定滤液中的 NO_3^--N 含量。

1.5 土壤和地下水中 NO_3^--N 含量评价标准

秦遂初等[16]研究了蔬菜地土壤障碍的诊断指标,指出蔬菜地土壤 NO_3^--N 累积量在0～33.8 mg/kg内为安全范围,45.2 mg/kg为污染临界点,超过67.7 mg/kg为严重污染水平。

通常认为,地下水中 NO_3^--N 的浓度超过3.0 mg/L时,便是由人类活动造成的。国际上对饮用水中 NO_3^--N 含量的最大允许值(Maximum acceptable concentration,MAC)有多个标准,最常用的有2个,即美国标准为10 mg/L;世界卫生组织(WHO)制定的标准为11.3 mg/L。我国规定饮用地下水源的Ⅲ类标准 NO_3^--N 浓度为20 mg/L(GB/T14848-93)。相关医学研究表明,饮用水 NO_3^--N 含量超过20 mg/L时,将会危及人类健康。本文采用美国标准10 mg/L作为MAC进行评价。

2 结果与分析

2.1 不同菜地土壤各层次 NO_3^--N 含量

对武汉市城郊区具有典型代表性菜地进行的一年监测结果表明,菜地土壤 NO_3^--N 累积量平均值为11.2 mg/kg,最大值为165.4 mg/kg,最小值为0.5 mg/kg,不同菜地不同土层以及不同取样时期土壤累积量差异较大($CV=118\%$),NO_3^--N 累积量低于22.6 mg/kg的样品占样品总数的90%;NO_3^--N 累积量超过45.2 mg/kg的样品占样品总数的3%。

试验点1土壤为砂性,0—20 cm土壤 NO_3^--N 积累量随施肥时间和作物生长及水分输入的变化幅度较大。施肥后15～30 d内土壤 NO_3^--N 积累量有一个峰值,虽然春季和夏季肥料施用量相同,但是夏季水分输入量较多,因此就土壤 NO_3^--N 累积峰值的比较来看,夏季(31.2 mg/kg)较春季(14.9 mg/kg)大,且出现的时间较早;冬季施肥量较春、夏季多,土壤水分蒸发量少,土壤湿度大,NO_3^--N 累积量(67.5 mg/kg)最大。春、夏和秋季由于水分输入较多,土壤 NO_3^--N 淋洗量较大,且大部分淋洗到100 cm土层以下,加之蔬菜生长速度较快,对养分的吸收较多,因此20—100 cm土层 NO_3^--N 积累量较少;冬季水分输入量少,作物生长速度慢,吸收养分少,淋洗速率慢,20—100 cm土层 NO_3^--N 积累量较其他季节多。整个监测周期内,0—20 cm土层内的 NO_3^--N 积累量基本较20—100 cm土层高(图1A)。试验点2土壤也为砂性土,0—20 cm土层 NO_3^--N 累积规律与试验点1相似。与试验点1相比,试验点2的蔬菜品种和生长期不同,造成 NO_3^--N 累积量峰值较试验点1高,且峰值出现的时间不同,这与施肥时间有一定的关系(图1B)。

试验点3、4和5均为粘性土壤,0—20 cm与20—100 cm土层的 NO_3^--N 累积量差异较小,0—20 cm土层在每次施肥后30～45 d有一个 NO_3^--N 的累积峰值,峰值的大小与施肥量相关。作物生长前期,100 cm内各土层 NO_3^--N 的累积量从上层向下

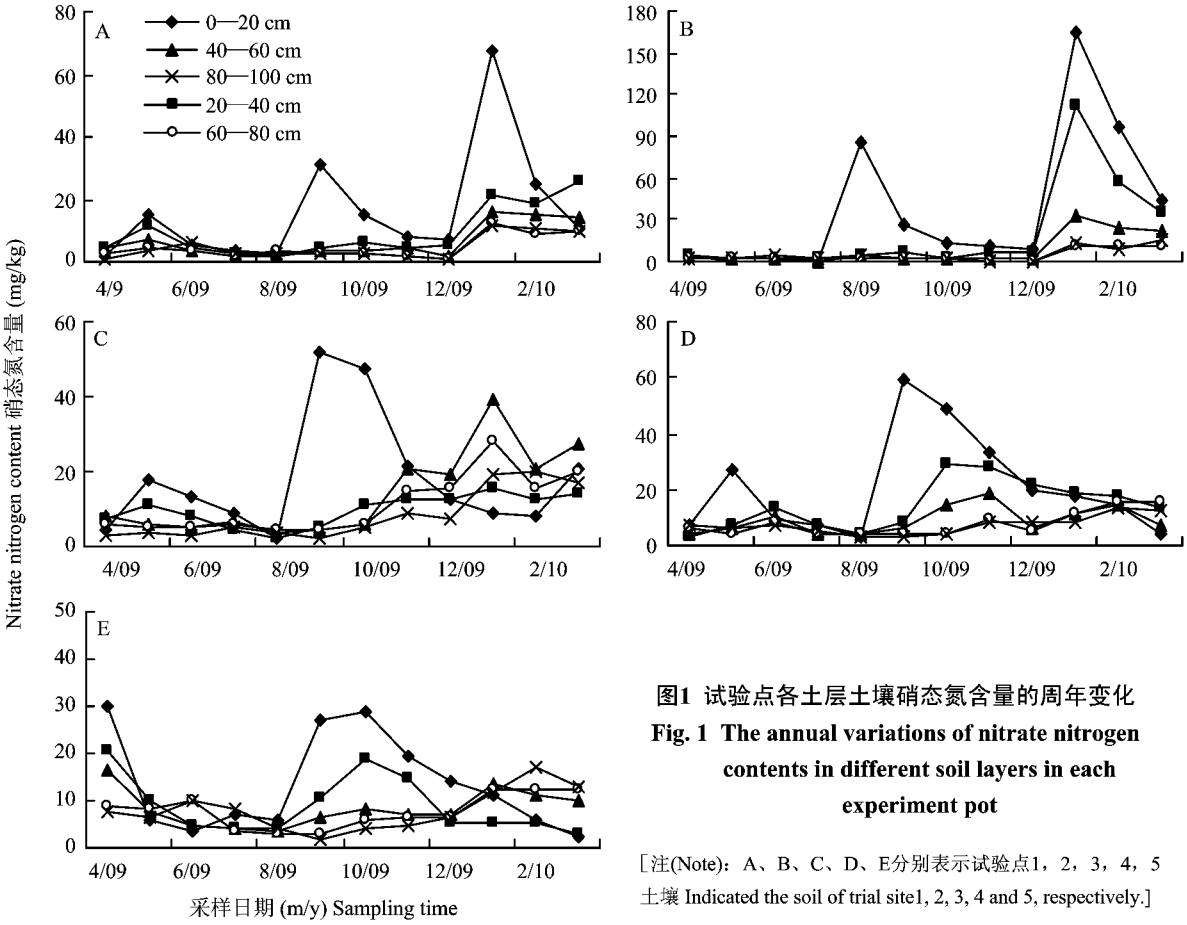

图1 试验点各土层土壤硝态氮含量的周年变化

Fig. 1 The annual variations of nitrate nitrogen contents in different soil layers in each experiment pot

[注(Note)：A、B、C、D、E分别表示试验点1，2，3，4，5土壤 Indicated the soil of trial site1, 2, 3, 4 and 5, respectively.]

层逐渐降低，随着作物生长对养分的吸收及 NO_3^--N 淋失，上层土壤中 NO_3^--N 的累积量逐渐降低，而下层土壤 NO_3^--N 的累积量逐渐增加，在作物收获期呈现出与前期相反的趋势。虽然试验点 5 的氮肥施用量较试验点 3 和 4 多，但是由于试验点 5 的水分输入较多，淋洗量较大，因此 100 cm 土层中 NO_3^--N 的平均累积量(9.2 mg/kg)较试验点 3(12.2 mg/kg)和试验点 4(11.9 mg/kg)低(图 1C、图 1D、图 1E)。

监测结果表明，土壤 NO_3^--N 积累量的高低与施肥量、作物的生长，以及水分的输入量有直接的关系，NO_3^--N 在土壤剖面的迁移量和迁移速度取决于土壤的物理性质和水分的输入量。以土壤 NO_3^--N 含量 45.2 mg/kg 为评价诊断标准，目前试验区域土壤基本上处于安全水平。

2.2　菜地土壤溶液中的 NO_3^--N 含量

由于蔬菜根系大部分分布在 60 cm 以内，因此进入 60 cm 土层以下的氮素大部分难以被蔬菜吸收利用，成为地下水污染的潜在来源，增加了氮素进入地下水的风险。地下 60 cm 深处土壤溶液的 NO_3^--N 含量一般在施肥后 1 ～ 2 个月内达到最高，具体时间根据土壤的颗粒组成不同而有差异。冬季和春季土壤输入水分量少，淋洗较少，但是土壤溶液中 NO_3^--N 浓度较夏秋季节高；夏季雨水较多，对土壤溶液中的 NO_3^--N 有一定的稀释作用，地下 60 cm 深处土壤溶液的 NO_3^--N 含量较低；而秋季有一次施肥种植，加上有一定的雨水和灌溉，所以地下 60 cm 深度处土壤溶液的 NO_3^--N 含量呈上升趋势。

通过对两个蔬菜基地一年的监测(图 2)发现，试验点 1 的土壤为砂性，对 NO_3^--N 的吸附能力弱，大量的水分输入造成了 NO_3^--N 的大量淋失，同时也稀释了土壤溶液中的 NO_3^--N 的浓度，因此在地下 60 cm 土壤深处土壤溶液中 NO_3^--N 含量较低，平均值为 21.2 mg/kg，最高浓度为 35.0 mg/kg；而试验点 3 的土壤为粘性，对养分的吸附能力较强，减少了土壤中水分和养分的淋失，在作物生长过程中不需要大量的水分灌溉，NO_3^--N 含量较少，但是土壤溶液中的 NO_3^--N 含量较高，平均值为 31.8 mg/kg，最高浓度可达 41.5 mg/kg。

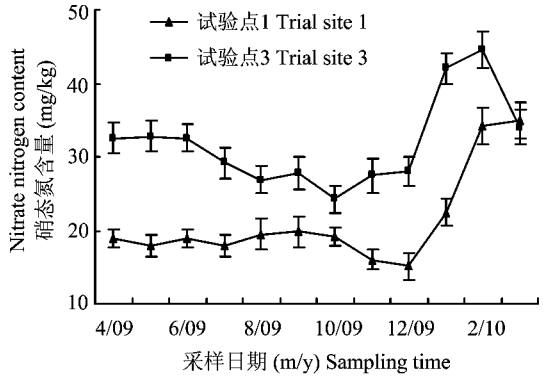

图2 60 cm 深度土壤溶液中硝酸盐含量的周年变化

Fig. 2 The annual variations of the nitrate contents in soil solution at 60 cm soil depth

2.3 菜地附近井水中的 NO_3^--N 含量

由图3看出,试验点1所在区域井水 NO_3^--N 含量最大值达 39.8 mg/L,最低为 17.1 mg/L,平均 27.9 mg/L;试验点3所在区域井水 NO_3^--N 含量最大值 30.2 mg/L,最低 15.6 mg/L,平均 21.7 mg/L;全年各个时期所取样品中的 NO_3^--N 含量均超过了 10 mg/L 的安全饮用标准。试验点3所在区域井水中的 NO_3^--N 含量一般在施肥2～3个月后达到峰值,而试验点1所在的区域,由于土壤砂粒含量和水分输入多,施肥后1～2个月即可达到峰值。

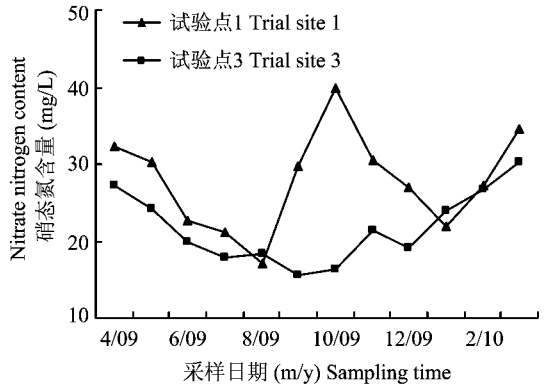

图3 井水中 NO_3^--N 含量的周年变化

Fig. 3 The annual variations of the nitrate contents in well water

在降水量达不到蔬菜生长需求的时期,菜农往往通过井水灌溉来解决蔬菜对水分的需求问题,虽然这种利用高 NO_3^--N 含量井水的灌溉方式也是对地下水中淋失氮素的一种循环利用,但是由于井水 NO_3^--N 含量较高,因此也有可能增加土壤中的 NO_3^--N 含量。

3 讨论

NO_3^--N 污染与农业生产之间的关系密不可分。NO_3^--N 淋洗是土壤中 NO_3^--N 随水分向下运动的结果,促进或阻碍其中任何一个因子都影响土壤中的 NO_3^--N 的淋洗。菜地生态系统中氮肥的大量施用,致使农田土壤剖面 NO_3^--N 累积问题日益突出,由此造成蔬菜种植区及其周边地区地下水硝态氮污染,严重威胁地下水系的安全。

砂性土壤中,作物生长前期,需肥量少,NO_3^--N 主要积累在0—20 cm 的土层,随着作物对养分的吸收和 NO_3^--N 随水分大量向下迁移,表层土壤的 NO_3^--N 含量逐渐降低,20—100 cm 土层中 NO_3^--N 的积累量逐渐增加;在作物生长后期,由于作物的吸收和淋溶,表层土壤 NO_3^--N 累积量逐渐降低,并在下季蔬菜施肥前达到蔬菜生长周期中的最低积累水平。同时,大量的水分输入对土壤溶液中的 NO_3^--N 进行了稀释,降低了土壤溶液中 NO_3^--N 的浓度。施入土壤的氮肥一部分被作物吸收,一部分残留在土壤中,其余的随着土壤水分向深层淋溶直至进入地下水,且水分输入量越多,NO_3^--N 进入地下水的量就越大。因此,在一定条件下,NO_3^--N 在土壤中的残留量和进入地下水的量成反比。在粘性土壤中,土壤孔隙度较小,保肥保水性好,相对砂性土壤来说不需要大量的水分灌溉,因此土壤中残留的硝态氮较多,淋失的较慢。

综合5个监测点的结果可看出,土壤中的 NO_3^--N 积累量不但取决于施肥量,还在很大程度上受土壤物理性质的影响,同延安等[17]在对陕西三种类型土壤剖面硝酸盐累积的研究中也得出了相同的结论;陈效民等[18]的研究也表明,在水分饱和条件下,NO_3^--N 的垂直运移过程主要受土壤粘粒含量的影响,随着粘粒含量的增加 NO_3^--N 出流的时间推迟,NO_3^--N 浓度越高在土壤中的淋溶速度也越快。因此,菜农在施肥时应考虑土壤因素,在土壤偏砂性的情况下,施肥应少量多次,同时避免大量灌水以减少 NO_3^--N 的淋失。夏季降水量较多,土壤中NO_3^--N 随水分向下层土壤的迁移量较大,因此夏、秋两季土壤中的 NO_3^--N 积累量全年中最低,此时土壤溶液中 NO_3^--N 含量也较低,而冬季和春季情况则相反。

造成各监测点井水样品中 NO_3^--N 含量差异的原因可能是由于夏季大量的水分输入,试验点1的砂性土壤中的 NO_3^--N 经过水分淋洗进入地下水,这

从试验点 1 土壤溶液中的 NO_3^--N 浓度也可以看出,60 cm 深度处土壤中 NO_3^--N 含量较低;而试验点 3 的土壤偏粘性,保肥性好,对水分的淋洗有一定的缓冲能力,因此地下水中 NO_3^--N 浓度高峰出现时间较试验点 1 附近的井水晚,而此时土壤溶液中的 NO_3^--N累积量也较试验点 1 高。

由本研究的结果可知,在一定的条件下,地下水 NO_3^--N 含量与土壤理化性质和土壤以及土壤溶液中的 NO_3^--N 含量有一定的关系。土壤偏砂性时,对硝态氮的吸附能力较弱,硝态氮容易随土壤水分向深层迁移直至进入地下水,因此土壤中的硝态氮含量较低,同时土壤溶液中的硝态氮含量也往往较低,但是由于大量硝态氮向下迁移造成了地下水中的硝态氮含量增加。土壤偏粘性时,土壤孔隙度小,对硝态氮的吸附能力较强,水分淋失速度较慢,不需要大量的水分灌溉,因此土壤中硝态氮含量较高,同时土壤溶液中的硝态氮含量也较高,而由于硝态氮向下层土壤的迁移量较少,所以地下水硝态氮含量较低。

对土壤溶液和井水水样测定分析的结果表明,由于该研究区域蔬菜种植年限较长,且施肥量较大,造成了菜地氮素的大量淋失,已经对该区域地下水造成了严重的硝酸盐污染。这一结果提醒我们,由于土壤和气候等条件的不同,一个地区的地下水是否受到了硝酸盐污染,不能仅从土壤中的硝酸盐累积量的多少来判断,而是要综合多方面的因素进行分析。

为了保持土壤的可持续生产能力,减轻菜地生态系统对环境的影响,发展环境友好型农业,亟需采取一些措施来推动蔬菜产业的标准化、规模化发展,例如,根据各种蔬菜作物的生长特性、吸肥特性和需肥规律来制定施肥技术和施肥方法;调整种植模式,采取轮作、套作等根据作物根系生态位不同的原理来搭配种植作物;根据不同作物需肥量进行氮、磷、钾等养分的平衡配施;种植填闲作物[19];分期施肥或是研究缓释、控释肥料的生产、施用等技术;施用硝化抑制剂[20]或脲酶抑制剂减缓硝酸盐的转化等。

参 考 文 献:

[1] 国家统计局. 中国统计年鉴 2009[R]. 北京: 中国统计出版社, 2009.
National Bureau of Statistics of China. China Statistical Yearbook 2009[R]. Beijing: China Statistics Press, 2009.

[2] 杜连凤, 吴琼, 赵同科, 等. 北京市郊典型农田施肥研究与分析[J]. 中国土壤与肥料, 2009, (3): 75-78.
Du L F, Wu Q, Zhao T K *et al.* Investigation of fertilizer application in different farm lands in suburbs of Beijing[J]. China Soils Fert., 2009, (3): 75-78.

[3] 谢建昌, 陈际型. 菜园土壤肥力与蔬菜合理施肥[A]. 贾继文, 李文庆. 山东省蔬菜大棚土壤养分状况与施肥状况的调查研究[M]. 南京: 河海大学出版社, 1997. 73-75.
Xie J C, Chen J X. Vegetable soil fertility and the fertilizer application[A]. Jia J W, Li W Q. The study of vegetables soil nutrient and fertilizer application status in Shandong province [M]. Nanjing: Hehai University Press, 1997. 73-75.

[4] 夏运生, 何江华, 万洪富. 广东省农产品污染状况分析[J]. 生态环境, 2004, 13 (1): 109-111.
Xia Y S, He J H, Wan H F. Analysis of the status of farm produce pollution in Guangdong province[J]. Ecol. Environ., 2004, 13(1): 109-111.

[5] Maeda M, Zhao B, Ozaki Y *et al.* Nitrate leaching in an andisol treated with different types of fertilizers [J]. Environ. Poll., 2003, 121: 477-487.

[6] 胡承孝, 邓波儿, 刘同仇. 氮肥水平对蔬菜品质的影响[J]. 土壤肥料, 1996, (3): 34-36.
Hu C X, Deng B E, Liu T C. Effect of nitrogen levels on vegetable quality[J]. Soil Fert., 1996, (3): 34-36.

[7] Zhao C S, Hu C X, Huang W *et al.* A lysimeter study of nitrate leaching and optimum nitrogen application rates for intensively irrigated vegetable production systems in Central China[J]. J. Soils Sed., 2010, 10: 9-17.

[8] 陈新平, 邹春琴, 刘亚萍, 张福锁. 菠菜不同品种累积硝酸盐能力的差异及其原因[J]. 植物营养与肥料学报, 2000, 6 (1): 30-34.
Chen X P, Zou C Q, Liu Y P, Zhang F S. The nitrate content difference and the reason among four spinach varieties[J]. Plant Nutr. Fert. Sci., 2000, 6(1): 30-34.

[9] 姚春霞, 陈振楼, 陆利民, 等. 上海市郊菜地土壤和蔬菜硝酸盐含量状况[J]. 水土保持学报, 2005, 19(1): 85-88.
Yao C X, Chen Z L, Lu L M *et al.* Nitric nitrogen content of soil and vegetable in Shanghai suburb[J]. J. Soil Water Conserv., 2005, 19(1): 85-88.

[10] Power J F, Schepers J S. Nitrate contamination of groundwater in North America[J]. Agric. Ecosyst. Environ., 1989, 26(3-4): 165-187.

[11] 朱济成. 关于氮肥地下水流失率的初步研究[J]. 环境科学, 1983, 4(5): 35-39.
Zhu J C. The study of underground water nitrogen fertilizer losing ratio[J]. Chin. J. Environ. Sci., 1983, 4(5): 35-39.

[12] 刘宏斌, 李志宏, 张云贵, 等. 北京平原农区地下水硝态氮污染状况及其影响因素研究[J]. 土壤学报, 2006, 45(3): 405-413.
Liu H B, Li Z H, Zhang Y G *et al.* Nitrate contamination of groundwater and its affecting factors in rural areas of Beijing plan [J]. Acta Pedol. Sin., 2006, 45(3): 405-413.

[13] 徐福利, 梁银丽, 陈志杰, 等. 延安市日光温室蔬菜施肥现状与环境效应[J]. 西北植物学报, 2003, 23(5): 797-801.
Xu F L, Liang Y L, Chen Z J *et al.* The study of fertilizer

application and its effect to environment in sunlight greenhouse in Yan' an[J]. Acta Bot. Bor-Occid. Sin., 2003, 23(5): 797-801.

[14] Ju X T, Kou C L, Zhang F S, Christie P. Nitrogen balance and groundwater nitrate contamination: Comparison among three intensive cropping systems on the North China plain [J]. Environ. Poll., 2006, 143: 117-125.

[15] Zhang W L, Tian Z X, Zhang N *et al*. Nitrate pollution of groundwater in northern China[J]. Agric. Ecosyst. Environ., 1996, 59: 223-231.

[16] 秦遂初. 作物营养障碍的诊断及其防治[M]. 杭州: 浙江科学技术出版社, 1988.
Qin S C. The diagnosis and control of crop nutrition obstacles [M]. Hangzhou: Zhejiang Science and Technology Press, 1988.

[17] 同延安, 石维, 吕殿青, Ove Emteryd. 陕西三种类型土壤剖面硝酸盐累积、分布与土壤质地的关系[J]. 植物营养与肥料学报, 2005, 11(4): 435-441.
Tong Y A, Shi W, Lü D Q, Emteryd O. Relationship between soil texture and nitrate distribution and accumulation in three types of soil profile in Shaanxi [J]. Plant Nutr. Fert. Sci., 2005, 11(4): 435-441.

[18] 陈效民, 邓建才, 柯用春, 等. 硝态氮垂直运移过程中的影响因素研究[J]. 水土保持学报, 2003, 17(2): 12-15.
Chen X M, Deng J C, Ke Y C *et al*. Study on influence factors in process of nitrate vertical transport [J]. J. Soil Water Conserv., 2003, 17(2): 12-15.

[19] 于红梅, 曾燕舞. 填闲作物的种植对下茬蔬菜产量及土壤硝态氮含量的影响[J]. 安徽农业科学, 2007, 35(8): 2336-2337, 2339.
Yu H M, Zeng Y W. Effect of nitrogen catch crop on vegetable yields and nitrate content[J]. J. Anhui Agric. Sci., 2007, 35(8): 2336-2337, 2339.

[20] Cui M, Sun X C, Hu C X *et al*. Effective mitigation of nitrate leaching and nitrous oxide emissions in intensive vegetable production systems using a nitrification inhibitor, dicyandiamide [J]. J. Soils Sed., 2011, 11: 722-730.