

宁夏灌区不同类型农田土壤氮素累积与迁移特征

柯 英¹, 郭鑫年¹, 冀宏杰², 张维理², 赵 营^{1*}

(1.宁夏农林科学院农业资源与环境研究所, 宁夏 银川 750002; 2.中国农业科学院农业资源与农业区划研究所, 北京 100081)

摘 要:在宁夏灌区选择设施菜田($n=4$)和水旱轮作大田($n=4$),通过田间多点取样观测和室内分析的方法,研究了2种类型农田土壤氮素累积与分布特点,以及其迁移对浅层地下水的影响。结果表明,设施菜田0~150 cm土壤剖面溶解性总氮(TSN)、硝态氮(NO_3^- -N)和溶解性有机氮(SON)含量都显著高于大田,前者分别是后者的1.5~5.6、1.5~3.4倍和1.6~9.8倍。设施菜田土壤氮素主要累积在0~5 cm和5~20 cm土层,而大田主要在40~100 cm土体。设施菜田和大田土壤溶解性总氮占全氮比例分别在5.4%~11.5%和2.2%~4.9%之间,前者的淋失风险较高。设施菜田各形态氮素累积量表现为 $\text{SON} > \text{NO}_3^-$ -N $>$ NH_4^+ -N,大田为 NO_3^- -N $>$ $\text{SON} >$ NH_4^+ -N。设施菜田浅层地下水中TSN、 NO_3^- -N和SON含量也都显著高于大田,前者平均含量分别是后者的9.5、13.8倍和7.0倍。因此,硝态氮和溶解性有机氮都是2种类型农田氮素累积的主要形态,也是浅层地下水污染的重要来源。

关键词:宁夏灌区;设施菜田;水旱轮作大田;土壤氮素累积;浅层地下水

中图分类号:S153.6

文献标志码:A

文章编号:2095-6819(2014)01-0023-09

doi: 10.13254/j.jare.2013.0141

The Characteristics of Soil N Accumulation and Movement in Different Farmlands in the Yellow River Irrigation Region of Ningxia, China

KE Ying¹, GUO Xin-nian¹, JI Hong-jie², ZHANG Wei-li², ZHAO Ying^{1*}

(1. Institute of Agricultural Resources and Environment, Ningxia Academy of Agriculture and Forestry Sciences, Yinchuan 750002, China; 2. Institute of Agricultural Resources and Regional Planning, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China)

Abstract: The greenhouse fields ($n=4$) and open fields with rotation of paddy-upland crops ($n=4$) were chosen in the Yellow River Irrigation Region of Ningxia. A method of multiple-points field sampling investigation and laboratory analysis was conducted to study the characteristics of soil N accumulation and distribution in different soil profiles and its movement effect on N content in the shallow groundwater from two different farmlands. The results indicated that total soluble N (TSN), NO_3^- -N and soluble organic N (SON) contents in 0~150 cm soil in greenhouse fields were significantly higher than that in open fields, and the average contents in the former fields were 1.5~5.6, 1.5~3.4, 1.6~9.8 times as that in the latter fields, respectively. Different forms of N were mainly accumulated in 0~5 cm and 5~20 cm soil depth in greenhouse fields, and which were accumulated in 40~100 cm soil depth in open fields. Soil TSN accounted for TN by 5.4%~11.5% and 2.2%~4.9% in the greenhouse and open fields, respectively, and the former had a higher risk of soil N leaching losses. Different forms of dissolved N accumulation amount were $\text{SON} > \text{NO}_3^-$ -N $>$ NH_4^+ -N in 0~150 cm soil in greenhouse fields, and with the order of NO_3^- -N $>$ $\text{SON} >$ NH_4^+ -N in open fields. The TSN, NO_3^- -N and SON contents in the shallow groundwater in greenhouse fields were also significantly higher than that in open fields, the former were 9.5, 13.8, 7.0 times as that in the latter, respectively. Therefore, both NO_3^- -N and SON could be important soil N accumulation forms in these two different farmlands, and that may pollute the shallow groundwater in these two different fields.

Keywords: the Yellow River Irrigation Region of Ningxia; greenhouse fields; open fields with rotation of paddy-upland crops; soil N accumulation; shallow groundwater

收稿日期:2013-09-09

基金项目:宁夏自然科学基金项目(NZ13104);宁夏农林科学院自主研发项目(NKYG-13-04, NKYJ-13-03)

作者简介:柯 英(1963—),女,台湾台南人,实验师,主要从事作物高效施肥与环境研究。E-mail: keying5044038@163.com

* 通信作者:赵 营 E-mail: tony029@126.com

氮肥对促进作物生长和提高作物产量发挥重要作用,在农业生产中具有不可替代的地位。但大量不合理地施用氮肥导致肥料利用率和经济效益降低,造成农田土壤硝态氮过度累积、土壤质量下降以及水体污染等问题^[1-2]。我国禾谷类作物的氮肥利用率仅 28%~41%^[3],大部分氮素通过各种途径损失掉,而土壤氮素淋洗是重要的损失途径之一^[4-5]。农田土壤氮素累积与淋洗损失受到灌水与降水、土壤质地、轮作制度、肥料种类、施用量和施用方法等多种因素影响^[6],具有较大的变幅。冯兆忠等^[7]对内蒙古河套灌区不同农田氮素淋失研究表明:作物结构多样性有助于抑制氮素淋洗损失,不同农田 NO_3^- -N 淋失量为小麦地>白菜地>玉米地>葵花地>小麦-玉米地。在华北露地蔬菜轮作的研究发现,传统灌溉管理都能造成不同施氮处理下土壤氮素的淋洗损失,淋洗土层深度达到 150~180 cm^[8]。Jackson^[9]连续种植两茬莴苣的氮示踪研究表明,施肥 2 周后的 $^{15}\text{NO}_3^-$ -N 主要累积分布在 10~30 cm 土层,79.3%的施入肥料氮淋洗出 0~30 cm 土层,淋失量达 146 kg·hm⁻²。在我国山东省惠民县的设施蔬菜种植体系中($n=18$),由于大量的施肥造成淋洗进入地下水中硝态氮含量达 9~274 mg N·L⁻¹,99%的超过了 10 mg N·L⁻¹^[10]。过量施肥造成集约化农田土壤氮素累积和地下水硝态氮污染的研究已成为广泛关注的课题。

宁夏引黄灌区(宁夏灌区)农田类型包括设施菜地、水田和旱地等,其与内蒙古河套灌区农田类型有类似之处,年度内不同季节间农田系统氮素淋失差异较大,时空变异受灌区内地下水引水和农田排水的影响较大^[11]。随着宁夏灌区种植业结构的调整,农田类型多样化和集约化程度的不断提高,农田地下淋溶成为氮素流失的又一个重要途径,由施肥造成的农业面源污染也将加剧^[12-13]。已有研究发现,稻田和设施菜田的氮素淋失是对宁夏灌区农田地下水环境产生负面影响的主要途径^[14-15]。大多数农田土壤氮素累积与淋洗的研究集中在集约化菜地,而在宁夏灌区引黄灌溉导致地下水埋深变化的条件下,不同类型农田土壤剖面氮素累积与迁移特征,及其迁移过程对地下水体污染的综合研究依然缺乏定量或定性观测。因此,本文在宁夏灌区选择设施菜田和水旱轮作玉米地 2 种典型农田,研究了土壤剖面不同形态氮素的累积与分布特点,探讨浅层地下水埋深动态变化规律以及各形态氮素含量特征,为该地区不同类型农田氮素淋失污染控制提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验于 2011 年 4 月至 12 月在宁夏灌区的银川市掌政镇和永宁县王太堡进行,调查农田分布于东经 106°14'~106°21'、北纬 38°14'~38°26'范围,平均海拔 1 076 m,调查区域主要气候特点是干旱少雨,年均降水量 200 mm,蒸发量 2 000 mm 以上,年均气温 8~9℃,是典型的灌溉农业区。该灌区主要农田类型包括水田(水稻)、旱地(玉米和小麦)、日光温室农田等,土壤类型以灌淤土为主。选择不同施氮水平的集约化农田:设施菜田(种植年限 15~17 年)和常年水旱轮作大田,研究设施蔬菜和春玉米等不同作物收获时期土壤剖面全氮(Total N, TN)、溶解性总氮(Total soluble N, TSN)、溶解性有机氮(Soluble organic N, SON)、 NO_3^- -N 和 NH_4^+ -N 的累积与分布特点,评价其对浅层地下水的环境效应。不同类型农田的概况如表 1 所示。2 种类型农田都采用引黄河水灌溉,设施蔬菜采用畦灌方式,全生育期追肥灌水 4~6 次;大田玉米采用大水漫灌方式,全生育期追肥灌水 3~4 次。

表 1 不同类型农田概况

Table 1 Introduction of the different farmlands

编号	农田类型	种植作物	施氮量 [*] N, kg·hm ⁻²	采样地点	收获日期
GF1	设施菜田	番茄	584	银川市掌政镇	2011-12-10
GF2	设施菜田	芫荽	438	银川市掌政镇	2011-10-08
GF3	设施菜田	小油菜	405	银川市掌政镇	2011-12-14
GF4	设施菜田	番茄	877	银川市掌政镇	2011-12-14
OF1	大田	春玉米	300	永宁县王太堡	2011-09-26
OF2	大田	春玉米	360	永宁县王太堡	2011-09-26
OF3	大田	春玉米	342	永宁县王太堡	2011-09-25
OF4	大田	春玉米	285	永宁县王太堡	2011-09-25

注:* 施氮量根据当地田块施肥调查数据计算;GF 农田氮肥为 15-15 复合肥和尿素(46% N, 追肥),有机肥为猪粪和鸡粪等,其养分含量参考文献[16]数据;OF 农田氮肥为磷酸二铵(18% N, 46% P₂O₅)和尿素(46% N)。

1.2 样品采集方法

土壤采集:在设施番茄、芫荽和小油菜收获后,大田玉米 9 月下旬收获后,每种农田类型设 4 个点位,用土钻多点采集 0~5、5~20、20~40、40~60、60~100、100~150 cm 土层土样,每层采集 5 点混合,土壤分为 2 份,其中 1 份风干测定其 TN 含量,另 1 份为新鲜土样,带回实验室冷冻保存,测定其 TSN、 NO_3^- -N 和 NH_4^+ -N 含量, $\text{SON}(\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}) = \text{TSN} - (\text{NO}_3^- - \text{N}) - (\text{NH}_4^+ - \text{N})$ 。

浅层地下水采集:在设施蔬菜和大田玉米的各个生育期间,利用埋置的 380 cm 深的 PVC 管观测井,定期测定农田地下水埋深,作物收获后,分别采集农田地下水样约 500 mL,样品于-20 ℃冰柜中保存待测,测试前解冻,测定其 TSN、NO₃⁻-N 和 NH₄⁺-N 含量,SON(mg·kg⁻¹)=TSN-(NO₃⁻-N)-(NH₄⁺-N)。

1.3 测定项目与方法

风干土壤采用浓硫酸消煮,半微量凯氏定氮法测定 TN 含量。新鲜土样首先按 4:1 水土比用 1 mol·L⁻¹KCl 溶液浸提 30 min^[17-18],定性滤纸过滤。土壤浸提液和地下水样采用德国 DeChem-Tech. GmbH 公司生产的全自动间断分析仪 Cleverchem 200 测定土壤 NO₃⁻-N 和 NH₄⁺-N 含量;土壤浸提液和地下水样用碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法测定其 TSN 含量。

1.4 数据统计与分析

数据和图表处理用 Excel 2003 及 SPSS 11.0 进行统计分析,多重比较采用 LSD 法检验,显著水平为5%。

2 结果与分析

2.1 不同类型农田土壤剖面氮素累积与分布

2.1.1 不同类型农田土壤剖面 TN 累积与分布

从图 1 可以看出,GF 和 OF 农田土壤 TN 含量都是随着剖面深度的增加而呈降低趋势,表层土壤 0~5 cm 和 5~20 cm 含量最高,GF 农田表层土壤 TN 含量分别达 1.25~2.05 g·kg⁻¹ 和 1.18~1.69 g·kg⁻¹,高于 OF 农田的 0.94~1.04 g·kg⁻¹ 和 0.91~1.04 g·kg⁻¹。而 2 种类型农田 20~150 cm 各层土壤 TN 含量变化都不大,分别在 0.29~0.83 g·kg⁻¹ 和 0.51~0.83 g·kg⁻¹ 之间。

2.1.2 不同类型农田土壤剖面 TSN 累积与分布

图 2 结果表明,GF 农田土壤剖面 TSN 平均含量都高于 OF 农田,尤其是表层土壤 0~5 cm 和 5~20 cm 更为显著,前者含量最高分别达 278.1 mg·kg⁻¹ 和 184.7 mg·kg⁻¹。值得注意的是,OF 农田以化肥投入为主,不同地块农田土壤 TSN 在土壤剖面的累积峰各

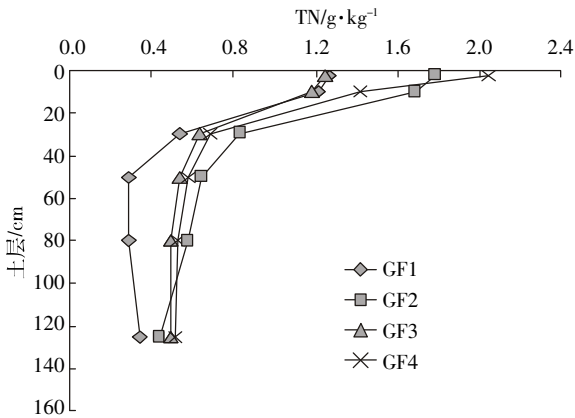


图 1 设施菜田(GF)和大田(OF)0~150 cm 各层土壤 TN 含量

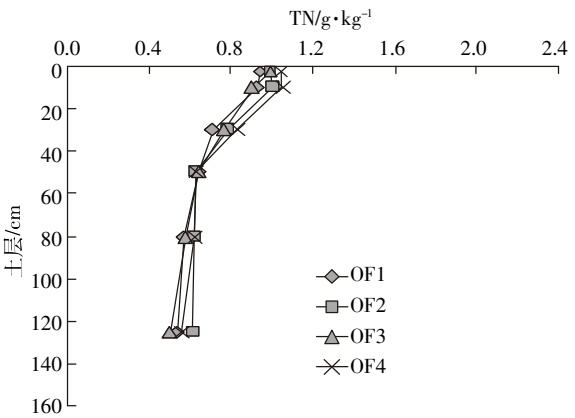


Figure 1 Total N (TN) content in 0~150 cm soil profile in greenhouse (GF) and open (OF) fields

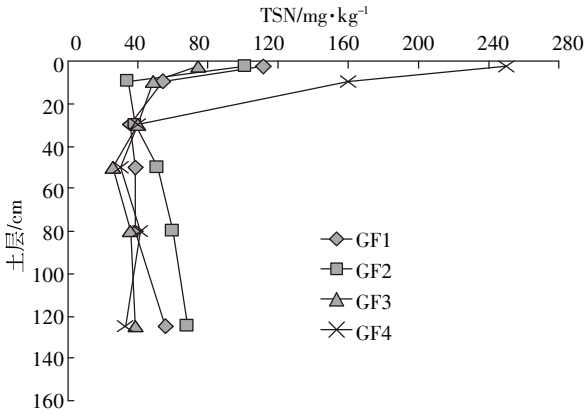


图 2 设施菜田(GF)和大田(OF)0~150 cm 各层土壤 TSN 含量

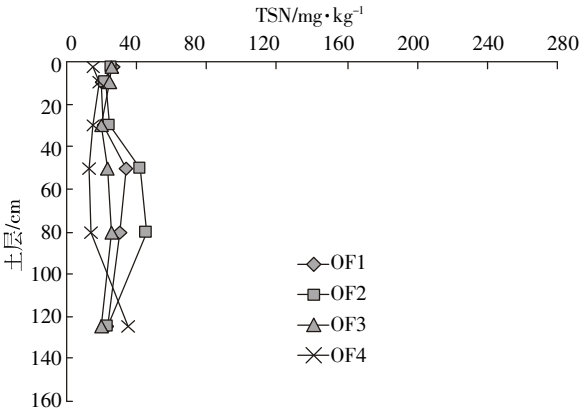


Figure 2 Total soluble N (TSN) content in 0~150 cm soil profile in greenhouse (GF) and open (OF) fields

有差异,但都主要累积在 40~100 cm 土体范围。GF 农田的 TSN 都主要累积在 0~5 cm 和 5~20 cm 表层土壤,这可能是由于 GF 农田大量有机肥和化肥表施。

2.1.3 不同类型农田土壤剖面 NO_3^- -N 累积与分布

图 3 显示,GF 和 OF 农田的 NO_3^- -N 累积峰值存在差异,前者主要在表层土壤 0~5 cm 和 5~20 cm,后者主要在 40~100 cm 范围内。GF 农田各个田块在 20~100 cm 都有较高的累积量,总体在 $7.8\sim 30.1\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 之间。由于 OF 农田追肥时期和追肥量的不同,造成不同地块间剖面土壤 NO_3^- -N 累积峰存在较大差异,OF2 农田累积峰值明显高于其他大田田块,60~100 cm 土壤 NO_3^- -N 含量达 $35.2\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,这与该田块大量施用氮肥密切相关(见表 1)。

2.1.4 不同类型农田土壤剖面 NH_4^+ -N 累积与分布

由图 4 可知,无论是 GF,还是 OF 农田,其 0~150 cm 各剖面 NH_4^+ -N 含量很小,分别在 $0.14\sim 2.08\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $0.20\sim 2.32\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 之间。考虑到灌溉黄河水中

NH_4^+ -N 含量,农田土壤剖面中累积的 NH_4^+ -N 会更小。因此,就旱地土壤而言,2 种类型农田 NH_4^+ -N 在土壤剖面累积量很有限,而且其在土壤剖面累积和分布并没有明显的规律性。

2.1.5 不同类型农田土壤剖面 SON 累积与分布

图 5 结果表明,GF 农田各个土壤剖面 SON 含量都高于 OF 农田,尤其是 0~5 cm 和 5~20 cm 表层土壤,前者最高含量分别为 $218.8\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $134.7\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,而后者分别仅为 $11.0\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $11.1\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,主要可能是 GF 农田表层施入大量的有机肥成为 SON 的重要来源,而 OF 农田 SON 向深层土壤淋洗移动的较为明显,但 GF 农田 20 cm 以下各剖面的 SON 含量差异并不大。

2.1.6 不同类型农田土壤剖面主要溶解性氮素含量

GF 和 OF 农田 0~150 cm 各层土壤剖面 TSN、 NO_3^- -N 和 SON 等主要溶解性氮素平均含量比较分别如图 6(a)、(b)、(c)所示。可以看出,GF 农田 0~5、

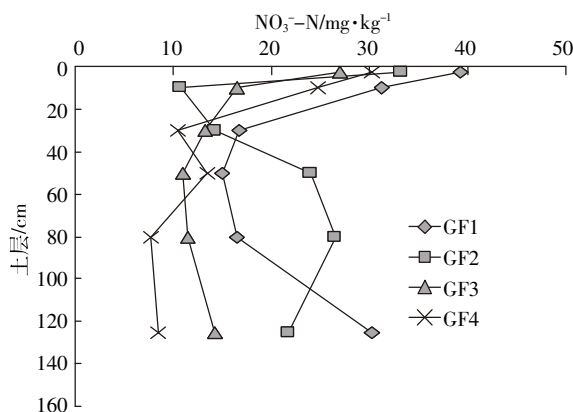


图 3 设施菜田(GF)和大田(OF)0~150 cm 各层土壤 NO_3^- -N 含量

Figure 3 Nitrate (NO_3^- -N) content in 0~150 cm soil profile in greenhouse (GF) and open (OF) fields

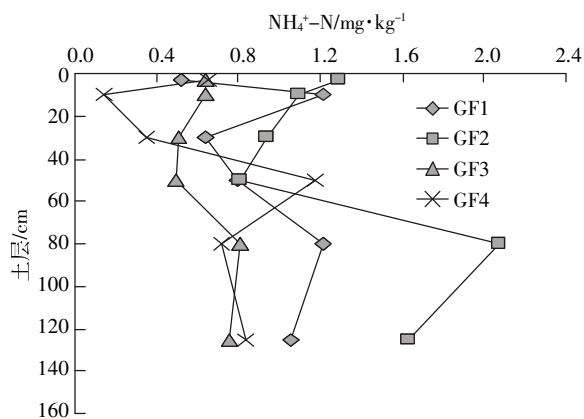
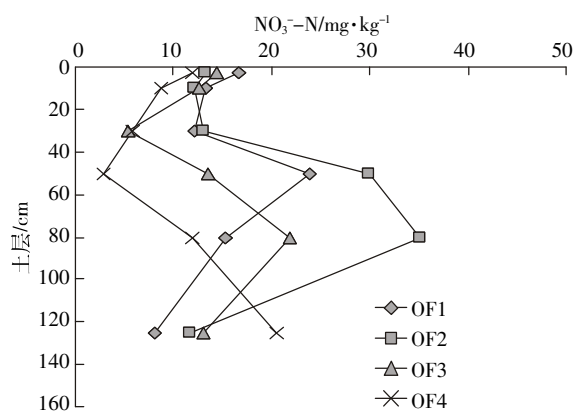
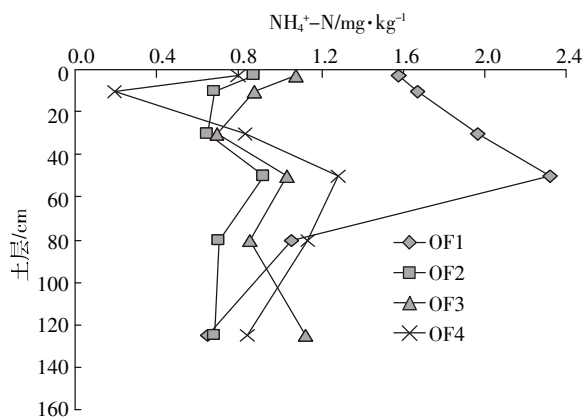


图 4 设施菜田(GF)和大田(OF)0~150 cm 各层土壤 NH_4^+ -N 含量

Figure 4 Ammonium N (NH_4^+ -N) content in 0~150 cm soil profile in greenhouse (GF) and open (OF) fields



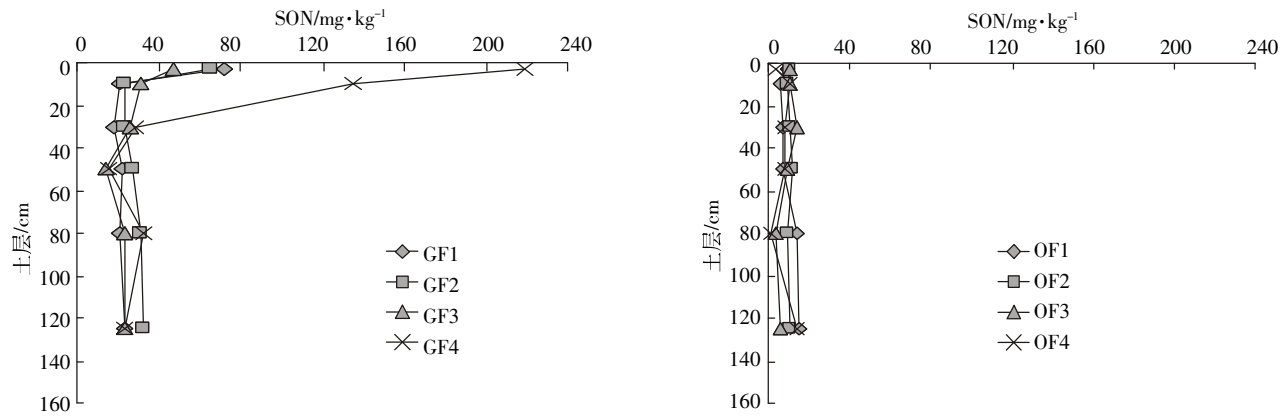


图 5 设施菜田(GF)和大田(OF)0~150 cm 各层土壤 SON 含量

Figure 5 Soluble organic N (SON) content in 0~150 cm soil profile in greenhouse (GF) and open (OF) fields

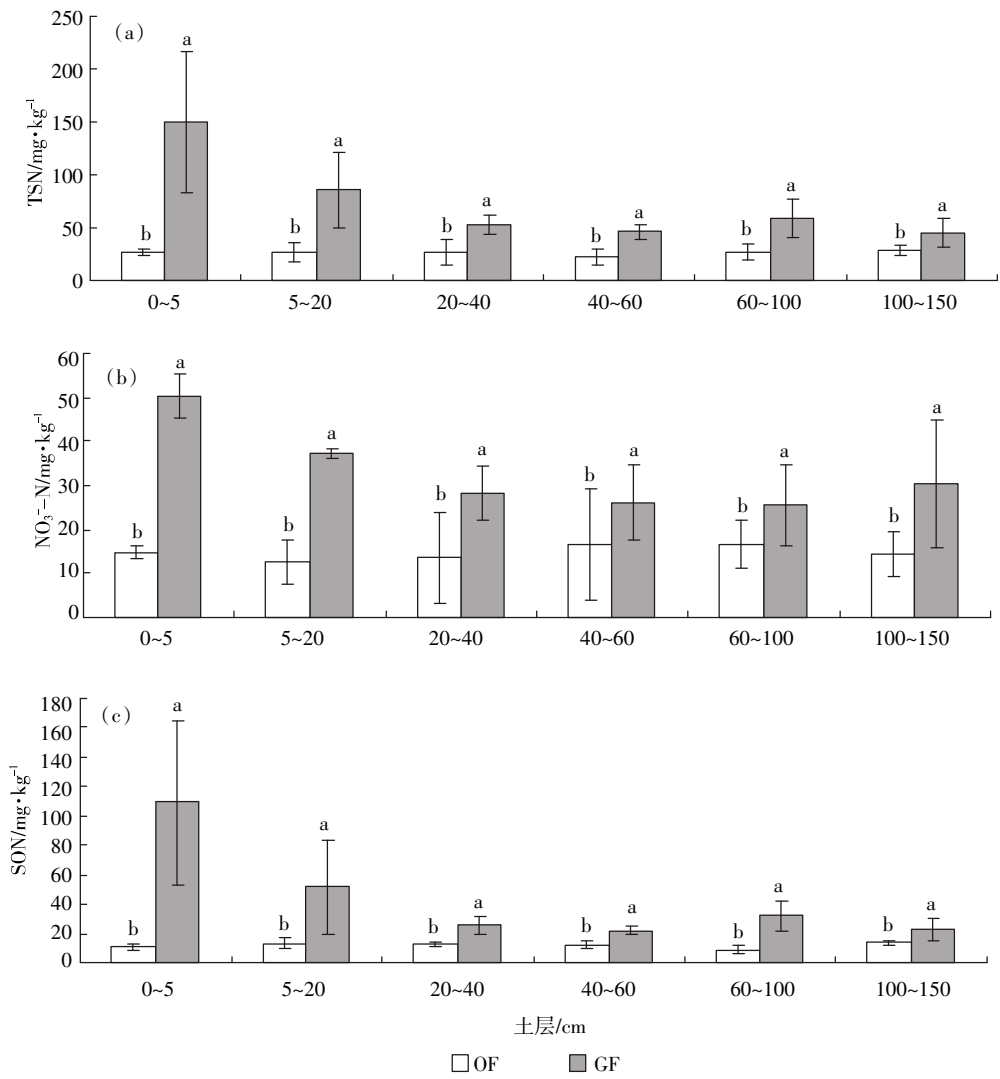


图 6 设施菜地(GF)和大田(OF)不同土壤剖面 TSN(a)、NO₃⁻-N(b)、SON(c)平均含量

Figure 6 The average contents of (a) TSN, (b) NO₃⁻-N, and (c) SON in 0~150 cm soil between GF and OF fields

5~20、20~40、40~60、60~100 cm 和 100~150 cm 土层的 TSN、 NO_3^- -N 和 SON 等溶解性氮素平均含量都显著高于 OF 农田。GF 农田各个土壤剖面的 TSN、 NO_3^- -N 和 SON 平均含量分别是 OF 农田的 1.5~5.6、1.5~3.4 倍和 1.6~9.8 倍,由此可见,GF 农田的氮素淋洗风险较高。

2.2 不同类型农田土壤剖面氮素累积形态分析

表 2 结果表明,不同类型农田土壤剖面氮素累积形态有很大差异。GF 农田土壤剖面 TSN/TN 的比例在 5.4%~11.5%之间,而 OF 农田 TSN/TN 为 2.2%~4.9%,显然 GF 农田的 TSN/TN 比例明显高于 OF 农田,因此其发生淋溶损失的风险也越高。值得注意的是,GF 农田 SON/TSN 的比例最高,达 54.5%~70.2%,其次是 NO_3^- -N/TSN,为 29.1%~43.1%;而 OF 农田是 NO_3^- -N/TSN 比例最高,达 44.9%~73.6%,其次是 SON/TSN,为 22.4%~49.8%。2 种农田 NH_4^+ -N/TSN 比例都最低,GF 和 OF 农田分别为 0.7%~2.7%和 3.4%~5.9%。

2.3 不同类型农田浅层地下水埋深、氮素含量与形态特征

2.3.1 不同类型农田浅层地下水埋深动态变化

OF 和 GF 2 种类型农田的浅层地下水埋深都呈动态变化(见图 7)。GF 农田 7—12 月的变幅在 130~230 cm 范围,其埋深在 7—10 月间逐渐降低,受 10 月底和 11 月初灌区农田冬灌的影响,地下水埋深又上升。OF 农田 4—10 月(春玉米全生育期间)的地下水埋深变幅在 86~240 cm 之间,不同田块的变化趋势差异较大,OF4 田块在 4 月下旬的埋深最浅,之后埋深不断降低;OF1、OF2、OF3 田块最浅埋深分别出现在 6 月和 7 月下旬,之后随着农田灌水减少,地下水埋深都不断降低。

2.3.2 不同类型农田浅层地下水各形态氮素含量

表 3 结果可知,GF 农田浅层地下水中 TSN、

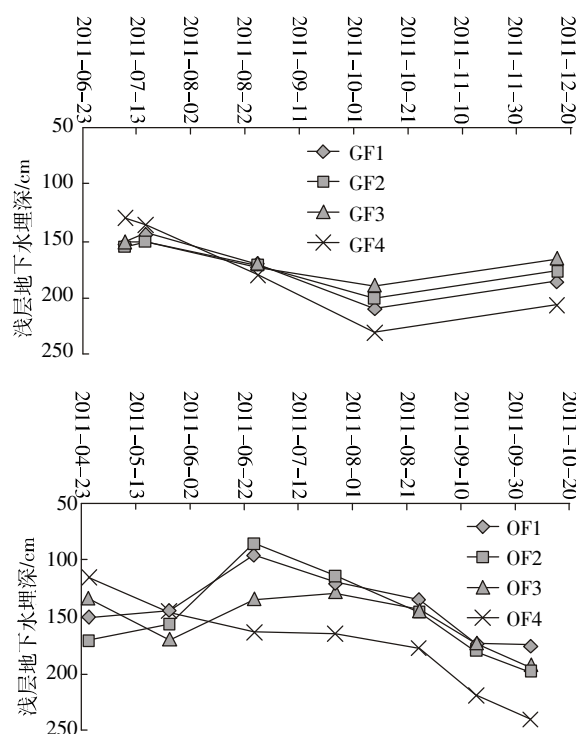


图 7 设施菜田(GF)和大田(OF)浅层地下水埋深动态

Figure 7 Dynamics of the shallow groundwater depth in greenhouse (GF) and open (OF) fields

NO_3^- -N 和 SON 含量都明显高于 OF 农田,其含量分别达 14.31~50.67、10.86~46.12 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 2.02~5.89 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。可以看出,GF 农田地下水 NO_3^- -N 含量都在 10 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 以上,已经超过了 WHO 的饮用水标准。因此,GF 农田下, NO_3^- -N 成为浅层地下水污染的主要氮素形态,占 TSN 比例达 75.9%~91.0%,SON 对浅层地下水影响也不容忽视,其占 TSN 比例为 9.0%~23.6%。OF 农田下, NO_3^- -N 也是浅层地下水污染的主要氮素形态,占 TSN 比例达 56.3%~66.5%,其次是 NH_4^+ -N 和 SON。

表 2 设施菜田(GF)和大田(OF)土壤剖面氮素形态分析(%)

Table 2 Analysis of the different N forms in soil profile in greenhouse (GF) and open (OF) fields(%)

土层/cm	设施菜田(GF)				大田 (OF)			
	TSN/TN	NO_3^- -N/TSN	NH_4^+ -N/TSN	SON/TSN	TSN/TN	NO_3^- -N/TSN	NH_4^+ -N/TSN	SON/TSN
0~5	8.1±3.0	29.1±11.5	0.7±0.4	70.2±11.6	2.4±0.6	61.4±10.2	4.6±1.1	34.0±10.8
5~20	5.4±4.0	34.8±17.8	1.7±1.3	63.5±18.5	2.2±0.4	54.1±8.0	4.0±3.1	41.9±11.0
20~40	5.8±0.9	36.0±8.8	1.6±0.7	62.4±9.2	2.6±0.6	44.9±14.2	5.3±3.1	49.8±15.9
40~60	7.8±3.9	43.1±3.1	2.4±1.0	54.5±3.3	4.4±2.0	55.7±22.5	5.9±3.5	38.4±19.9
60~100	9.6±2.8	34.8±11.7	2.7±0.8	62.5±12.5	4.9±2.1	73.6±16.2	4.0±2.7	22.4±16.9
100~150	11.5±5.2	37.4±12.4	2.2±0.3	60.4±12.6	4.6±1.1	52.5±14.0	3.4±1.5	44.1±15.0

表 3 设施菜田(GF)和大田(OF)浅层地下水氮素
平均含量(mg·L⁻¹)

Table 3 The average N concentration in the shallow groundwater in
greenhouse (GF) and open (OF) fields(mg·L⁻¹)

编号	TSN	NO ₃ ⁻ -N	NH ₄ ⁺ -N	SON
GF1	20.81	18.67	0.12	2.02
GF2	50.67	46.12	0.01	4.54
GF3	26.35	20.41	0.06	5.89
GF4	14.31	10.86	0.07	3.38
OF1	2.96	1.66	1.11	0.19
OF2	2.02	1.19	0.32	0.50
OF3	1.93	1.19	0.41	0.32
OF4	2.80	1.86	0.73	0.21

2.3.3 不同类型农田浅层地下水主要溶解性氮含量

图 8 可以看出,OF 和 GF 2 种类型农田主要溶解性氮素都存在显著差异,GF 农田地下水 TSN、NO₃⁻-N 和 SON 平均含量分别为 22.74、19.84 mg·L⁻¹ 和 2.83 mg·L⁻¹, 都显著高于 OF 农田的 2.39、1.43 mg·L⁻¹ 和 0.41 mg·L⁻¹,前者分别是后者的 9.5、13.8 倍和 7.0 倍,进一步证实设施菜田溶解性氮素淋失风险大,且对地下水污染严重。

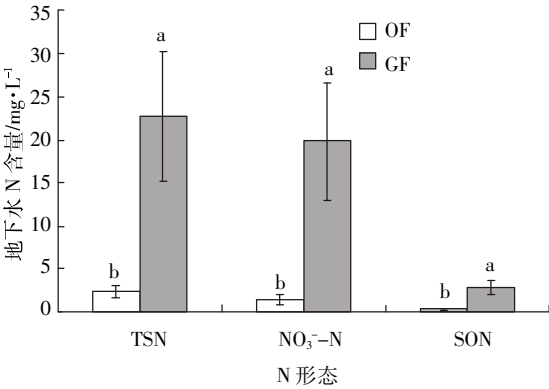


图 8 设施菜田(GF)和大田(OF)浅层地下水 TSN、NO₃⁻-N 和
SON 平均含量

Figure 8 The average concentrations of TSN, NO₃⁻-N, and SON in
groundwater in greenhouse (GF) and open (OF) fields

3 讨论

本试验中设施菜田 0~150 cm 土壤剖面的 NO₃⁻-N 平均含量是大田的 1.5~3.4 倍,以往研究也发现集约化程度较高的蔬菜、果园体系相比大田可以累积更多的硝态氮^[19]。本文研究还发现,大田土壤的氮素主要累积在 40~100 cm 深度,而设施菜田土壤氮素主要累

积在 0~5 cm 和 5~20 cm 土层,造成该差异的原因可能为禾谷类作物,如小麦和玉米等具有较深的根系(根深可达 2 m),但蔬菜类作物,如叶菜类作物根系主要分布在 0~30 cm 土层^[20],由此造成不同类型农田作物对土壤氮素的累积与利用不同。

本研究中 0~150 cm 各层土壤剖面中 TSN、NO₃⁻-N 和 SON 含量都显著高于大田,其原因为与大田作物种植相比,由于高频率、高强度的施肥和灌水管理,设施菜田土壤氮素累积较多^[5,21]。设施菜田地下水中 NO₃⁻-N 含量均超过了 WHO 的标准 10 mg·L⁻¹,说明设施菜田的氮素较大田淋失更为严重。以往研究发现,陕西关中平原菜地土壤硝态氮向下淋洗迁移程度明显高于粮田,而且可能造成 2 m 以下土层累积大量硝态氮;57%的菜地(n=14)井水硝酸盐浓度超过了 10 mg N·L⁻¹,而大田(n=84)井水硝酸盐浓度超标率仅为 7%^[22]。证实集约化程度较高的设施菜田的氮素淋失风险较大,其对地下水的污染风险加大。本研究中设施蔬菜多属于移栽或叶菜类蔬菜,其根系也比较浅,对深层累积的氮素很难利用上,受宁夏灌区农田引黄灌溉抬升地下水位的影响,其更易造成大量深层累积的氮素淋洗出根层。

本试验观测结果表明,大田土壤 SON 占溶解性总氮比例为 10.5%~69.5%,但其在 0~150 cm 土体的含量仅为 1.5~15.2 mg·kg⁻¹,远低于设施菜田的 14.1~218.8 mg·kg⁻¹,说明不同类型农田氮素累积与淋洗形态也各有差异。有研究表明,溶解性有机氮(SON)是仅次于硝态氮的累积与淋洗形态^[23]。有机肥是设施蔬菜生产中重要的氮肥来源,也是 SON 的主要来源^[24]。森林土壤和有机农业土壤中溶解性有机氮是主要的氮素累积形态^[25],本研究中设施菜田由于大量投入有机肥和化肥,其土壤剖面中 SON 是主要累积与淋洗形态。Matlou 等^[26]报道农业用地上 SON 占总氮比例在 17%~32%范围,但如果没有有机肥施用的情况下,NO₃⁻-N 淋失占总氮 98%以上,只有痕量的 NH₄⁺-N 和 NO₂⁻-N 能检测到^[5]。在宁夏灌区设施菜田和水旱轮作大田中,土壤 SON 累积与淋洗都占据重要地位,其迁移过程和淋洗对地下水水质如何产生影响以及其与 NO₃⁻-N、NH₄⁺-N 的相互转化关系还需进一步深入研究。

4 结论

4.1 宁夏灌区不同类型农田土壤氮素累积与分布

设施菜田和水旱轮作大田 2 种类型农田土壤全

氮(TN)含量都随着土壤剖面深度增加而呈降低趋势;而设施菜田土壤剖面主要溶解性氮素含量都显著高于水旱轮作大田。由于设施菜田(GF)氮肥投入强度和水平较高,其在各土壤剖面的溶解性总氮(TSN)、 NO_3^- -N和SON平均含量分别是大田(OF)的1.5~5.6、1.5~3.4倍和1.6~9.8倍,设施菜田主要溶解性氮素主要累积在0~5 cm和5~20 cm表层土壤,水旱轮作农田主要累积在40~100 cm土体,设施菜田的氮素淋洗风险较高。

4.2 宁夏灌区不同类型农田土壤氮素累积形态

设施菜田和水旱轮作大田土壤剖面TSN/TN的比例分别在5.4%~11.5%和2.2%~4.9%之间,设施菜田溶解性氮素的比例较高,其发生淋溶损失的风险也越高。溶解性氮素累积形态方面,设施菜田为 $\text{SON} > \text{NO}_3^- \text{-N} > \text{NH}_4^+ \text{-N}$,大田为 $\text{NO}_3^- \text{-N} > \text{SON} > \text{NH}_4^+ \text{-N}$ 。 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 和SON都是2种类型农田溶解性氮素累积的重要形态。

4.3 宁夏灌区不同类型农田地下水氮素含量

设施菜田和水旱轮作大田的浅层地下水埋深变幅分别在130~230 cm和86~240 cm之间,受灌区水稻种植和农田灌溉影响较大。设施菜田主要溶解性氮素都显著高于水旱轮作大田,设施菜田地下水TSN、 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 和SON平均含量分别是大田的9.5、13.8倍和7.0倍。设施菜田地下水中 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 和SON含量分别达10.86~46.12 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ($>10.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$)和2.02~5.89 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$,水旱轮作农田分别为1.19~1.86 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和0.19~0.50 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。证实了设施菜田溶解性氮素淋失风险大,且对地下水污染严重。 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 和SON都可能是农田地下水污染的重要来源。

参考文献:

- [1] 张维理,田哲旭,张宁,等.我国北方农田氮肥造成地下水硝酸盐污染的调查[J].植物营养与肥料学报,1995,1(2):80-87.
ZHANG Wei-li, TIAN Zhe-xu, ZHANG Ning, et al. Investigation of nitrate pollution of underwater by nitrogen fertilizer in North China fields [J]. *Plant Nutr Fert Sci*, 1995, 1(2): 80-87. (in Chinese)
- [2] Conley D J, Paerl H W, Howarth R W, et al. Controlling eutrophication: nitrogen and phosphorus[J]. *Science*, 2009, 323: 1014-1015. doi: 10.1126/science.1167755.
- [3] 朱兆良,文启孝.中国土壤氮素[M].南京:江苏科学技术出版社,1992:213-249.
ZHU Zhao-liang, WEN Qi-xiao. Soil nitrogen in China [M]. Nanjing: Jiangsu Science and Technology Press, 1992: 213-249. (in Chinese)
- [4] Shrestha R K, Cooperband L R, MacGuidwin A E. Strategies to reduce nitrate leaching into groundwater in potato grown in sandy soils: case study from North Central USA [J]. *Am J Pot Res*, 2010, 87: 229-244. doi: 10.1007/s12230-010-9131-x.
- [5] 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 Sediments*, 2010(10): 9-17. doi: 10.1007/s11368-009-0063-3.
- [6] 朱兆良.农田中氮肥的损失与对策[J].土壤与环境,2000,9(1):1-6.
ZHU Zhao-liang. Loss of fertilizer N from plants-soil system and the strategies and techniques for its reduction [J]. *Soil and Environ Sci*, 2000, 9(1): 1-6. (in Chinese)
- [7] 冯兆忠,王效科,冯宗炜.河套灌区地下水氮污染状况[J].农村生态环境,2005,21(4):74-76.
FENG Zhao-zhong, WANG Xiao-ke, FENG Zong-wei. N pollution of groundwater in Hetao irrigation district [J]. *Rural Eco-Environment*, 2005, 21(4): 74-76. (in Chinese)
- [8] 汤丽玲,陈清,张宏彦,等.不同灌溉与施氮措施对露地菜田土壤无机氮残留的影响[J].植物营养与肥料学报,2002,8(3):282-287.
TANG Li-ling, CHEN Qing, ZHANG Hong-yan, et al. Effects of different irrigation and fertilization strategies on soil inorganic N residues in open field of vegetable rotation system [J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2002, 8(3): 282-287. (in Chinese)
- [9] Jackson L E. Fates and losses of nitrogen from a nitrogen-15-labeled cover crop in an intensively managed vegetable system [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2000, 64(4): 1404-1412.
- [10] Ju Xiao-tang, Kou Chang-lin, Zhang Fu-suo, et al. Nitrogen balance and groundwater nitrate contamination: Comparison among three intensive cropping systems on the North China Plain [J]. *Environmental Pollution*, 2006, 143: 117-125.
- [11] 郝芳华,欧阳威,李鹏,等.河套灌区不同灌季土壤氮素时空分布特征分析[J].环境科学学报,2008,28(5):845-852.
HAO Fang-hua, OUYANG Wei, LI Peng, et al. Temporal and spatial variability of nitrogen in soil in the Wulate irrigation district of the Hetao irrigation area in Inner Mongolia [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2008, 28(5): 845-852. (in Chinese)
- [12] 杨淑静,张爱平,杨正礼,等.宁夏灌区农业非点源污染负荷估算方法初探[J].中国农业科学,2009,42(11):3947-3955. doi: 10.3864/j.issn.0578-1752.2009.11.023.
YANG Shu-jing, ZHANG Ai-ping, YANG Zheng-li, et al. Agricultural non-point source pollution in ningxia irrigation district and preliminary study of load estimation methods [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2009, 42(11): 3947-3955. doi: 10.3864/j.issn.0578-1752.2009.11.023. (in Chinese)

- Chinese)
- [13] 曹艳春,冯永忠,杨引禄,等. 基于 GIS 的宁夏灌区农田污染源结构特征解析[J]. 生态学报,2011,31(12):3468-3477.
- CAO Yan-chun, FENG Yong-zhong, YANG Yin-lu, et al. GIS analysis of structural characteristics of pollution sources in irrigable farmland in Ningxia China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2011, 31(12): 3468-3477. (in Chinese)
- [14] 尹 娟,费良军,勉韶平. 宁夏银南灌区稻田控制排水条件下氮素淋失的研究[J]. 西北农林科技大学学报:自然科学版,2006,34(1): 108-112.
- YIN Juan, FEI Liang-jun, MIAN Shao-ping. Experiment on the nitrogen leaching in the drainage condition of rice field in Ningxia Yinnan irrigation region [J]. *Jour of North-west Sci-Tech Univ of Agri and For: Nat Sci Ed*, 2006, 34(1): 108-112. (in Chinese)
- [15] 赵 营,张学军,罗健航,等. 施肥对设施番茄-黄瓜养分利用与土壤氮素淋失的影响[J]. 植物营养与肥料学报,2011,17(2):374-383.
- ZHAO Ying, ZHANG Xue-jun, LUO Jian-hang, et al. Effect of fertilization on nitrogen leaching loss from soil and nutrients utilization by tomato and cucumber in greenhouse[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2011, 17(2): 374-383. (in Chinese)
- [16] 全国农业技术推广服务中心. 中国有机肥料养分志[M]. 北京: 中国农业出版社, 1999: 1-194.
- National Agricultural Technology Extension and Service Center. Nutrient chronicles of chinese organic fertilizer[M]. Beijing: China Agriculture Press, 1999: 1-194. (in Chinese)
- [17] Emteryd O,梁东丽,同延安. 植物-土壤-水和空气中无机营养元素的物理化学分析[M]. 西安:陕西科学技术出版社,2002: 140-144.
- Emteryd O, Liang Dong-li, Tong Yan-an. Chemical and physical analysis of inorganic nutrients in plant soil water and air[M]. Xian: Sciences and Technologies Press of Shaanxi, 2002: 140-144. (in Chinese)
- [18] 赵 营,周 涛,郭鑫年,等. 优化施肥对春小麦产量、氮素利用及平衡的影响[J]. 干旱地区农业研究,2011,29(6): 119-124.
- ZHAO Ying, ZHOU Tao, GUO Xin-nian, et al. Effect of optimum fertilization on spring wheat yield, N utilization and apparent N balance [J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2011, 29(6): 119-124. (in Chinese)
- [19] 王智超. 农田土壤硝态氮累积及干湿交替过程的影响[D]. 北京: 中国农业大学硕士学位论文, 2006.
- WANG Zhi-chao. Soil nitrate accumulation as affected by the process of wet and dry alternating in farmlands[D]. Beijing: Graduate thesis of China Agricultural University, 2006. (in Chinese)
- [20] Enio Campiglia, Roberto Mancinelli, Emanuele Radicetti, et al. Legume cover crops and mulches: effects on nitrate leaching and nitrogen input in a pepper crop (*Capsicum annuum* L.) [J]. *Nutr Cycl Agroecosyst*, 2011, 89(3): 399-412.
- [21] Shi Wei-ming, Yao Jing, Yan Feng. Vegetable cultivation under greenhouse conditions leads to rapid accumulation of nutrients, acidification and salinity of soils and groundwater contamination in South-Eastern China[J]. *Nutr Cycl Agroecosyst*, 2009, 83: 73-84. doi: 10.1007/s10705-008-9201-3.
- [22] 袁新民,同延安,杨学云,等. 灌溉与降水对土壤 NO_3^- -N 累积的影响[J]. 水土保持学报,2000,14(3): 71-74.
- YUAN Xin-min, TONG Yan-an, YANG Xue-yun, et al. Effect of irrigation and precipitation on soil nitrate nitrogen accumulation[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2000, 14(3): 71-74. (in Chinese)
- [23] 高忠霞,杨学云,周建斌,等. 小麦-玉米轮作期间不同施肥处理氮素的淋溶形态及数量[J]. 农业环境科学学报,2010,29(8): 1624-1632.
- GAO Zhong-xia, YANG Xue-yun, ZHOU Jian-bin, et al. Forms and amounts of nitrogen in leachates affected by different fertilizations after one wheat-maize rotation[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2010, 29(8): 1624-1632. (in Chinese)
- [24] Jensen L S, Mueller T, Magid J, et al. Temporal variation of C and N mineralization, microbial biomass and extractable organic pools in soil after oilseed nitrogen[J]. *Soil Bio Biochem*, 1997, 29(7): 1043-1055.
- [25] Perakis S S, Hedin L Q. Nitrogen loss from unpolluted South American forests mainly via dissolved organic compounds[J]. *Nature*, 2002, 415(6870): 416-419.
- [26] Matlou M C, Haynes R J. Soluble organic matter and microbial biomass C and N in soils under pasture and arable management and the leaching of organic C, N and nitrate in a lysimeter study[J]. *Applied Soil Ecology*, 2006, 34: 160-167. doi:10.1016/j.apsoil.2006.02.005.