

农田硝态氮淋溶规律对不同水氮运筹模式的响应

李 祯, 史海滨, 李仙岳, 张作为

(内蒙古农业大学水利与土木建筑工程学院, 呼和浩特 010018)

摘要: 为探明不同水氮运筹对淋溶水中 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 时空分布特征以及施氮量和灌水定额对 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 淋失量的影响, 进而制定安全有效的水氮运筹模式。试验采用裂区设计, 主区为灌水定额, 设置 3 个水平, 分别为 525(W1), 750(W2), 975(W3) m^3/hm^2 。副区为施氮量, 设置 5 个水平, 分别为 0(N0), 80(N1), 160(N2), 240(N3), 320(N4) kg/hm^2 。每个灌水定额下有 5 种施氮量处理, 共 15 个处理。并于 2014—2015 年连续 2 年进行田间试验。采用多孔 PVC 法和土钻法采集水样和土样, 测定淋溶水中 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 浓度并计算 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 淋失量。结果表明, 0—40 cm 埋深内, 对比第 1 次灌水前后 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 浓度发现, 随着施氮量的增加, W1 水平下 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 浓度 2 年的平均增幅远低于 W2 和 W3 水平下 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 浓度 2 年的平均增幅。随着灌水定额的增加, N1、N2 水平下的 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 浓度平均增幅远低于 N3、N4 水平下的 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 浓度平均增幅。 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 浓度平均增幅最大的为 52.5% 的 W3N3。 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 浓度平均值最高的为 8.29 mg/L 的 W3N4。与 0—40 cm 埋深内的各处理相比, 40—80 cm 埋深的各处理 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 浓度整体下降, 但整个生育期内淋溶水中 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 浓度的变化趋势与 0—40 cm 埋深内相一致。80—120 cm 埋深内, 施氮量、灌水定额以及两者的交互作用对 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 淋失量的影响呈极显著。当灌水定额一定时, 2014 年、2015 年 2 年的 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 淋失量随着施氮量增加而递增, 淋失率随着施氮量的增加而减少; 当施氮量一定时, $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 淋失量及淋失率均随着灌水定额的增加而递增。鉴于根层内需要充足的 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 以被作物吸收, 并保证 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 淋失量对地下水的污染在可控安全范围内, 故推荐 W2N3 为适用于当地的水氮运筹模式。

关键词: 水氮运筹模式; 施氮量; 灌水定额; 硝态氮浓度; 硝态氮淋失量

中图分类号: S158.5 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-2242(2017)01-0310-08

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcbx.2017.01.051

Response of the Nitrate Nitrogen Leaching Law to Different Water-nitrogen Management Patterns in Farmland

LI Zhen, SHI Haibin, LI Xianyue, ZHANG Zuowei

(Department of Water Conservancy and Civil Engineering, Inner Mongolia Agricultural University, Huhhot 010018)

Abstract: This research would be helpful to figure out the temporal-spatial distribution features of $\text{NO}_3^- - \text{N}$ in leaching water and the influence of two factors on $\text{NO}_3^- - \text{N}$ leaching loss with different water and nitrogen management patterns. Then made a safe and effective water-nitrogen management pattern. The experiment used a completely random split plot design method. The main plot was irrigation quota with three levels (W1: 525 m^3/hm^2 , W2: 750 m^3/hm^2 , W3: 975 m^3/hm^2). The split plot was nitrogen application with five levels (N0: 0 kg/hm^2 , N1: 80 kg/hm^2 , N2: 160 kg/hm^2 , N3: 240 kg/hm^2 , N4: 320 kg/hm^2). Every irrigation quota had five treatments with different nitrogen application rate. There were fifteen treatments in total. The field experiment was carried out in 2014, 2015. Adopted the methods of porous PVC and soil auger to collect water and soil samples. Measured the concentration of $\text{NO}_3^- - \text{N}$ in leaching water and calculated the leaching loss of $\text{NO}_3^- - \text{N}$. The results showed that: With the increase of nitrogen application, the two years' average increase of $\text{NO}_3^- - \text{N}$ concentration by W1 was far below the two years' average increase of $\text{NO}_3^- - \text{N}$ concentration by W2 and W3 within the soil depth of 0—40 cm. With the increase of irrigation quota, the average increase of $\text{NO}_3^- - \text{N}$ concentration by N1 and N2 were far below the average increase of $\text{NO}_3^- - \text{N}$ concentration by N3 and N4 within the soil depth of 0—40 cm. The largest average increase of

收稿日期: 2016-09-26

资助项目: 国家“十二五”科技支撑计划项目“内蒙古河套灌区粮油作物节水技术集成与示范”(2011BAD29B03)

第一作者: 李祯, (1989—), 男, 博士生, 主要从事节水灌溉及农田生态环境研究。E-mail: 18647387011@163.com

通信作者: 史海滨, (1961—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事节水灌溉原理及应用研究。E-mail: shi_haibin@sohu.com

$\text{NO}_3^- - \text{N}$ concentration was 52.5% which belonged to W3N3. The highest average concentration was 8.29 mg/L which belonged to W3N4. Compared with the treatments in 0—40 cm soil depth, the $\text{NO}_3^- - \text{N}$ concentration of treatments showed the overall declination within the soil depth of 40—80 cm. But the change trend of $\text{NO}_3^- - \text{N}$ concentration was consistent with the soil depth of 0—40 cm. Within the soil depth of 80—120 cm, the leaching loss of $\text{NO}_3^- - \text{N}$ was significantly influenced by the nitrogen application, irrigation quota, and the interaction of those two elements. When the irrigation quota was constant, the $\text{NO}_3^- - \text{N}$ leaching loss of 2014, 2015 would increase with the increase of nitrogen application. The $\text{NO}_3^- - \text{N}$ leaching rate of 2014, 2015 would decrease with the increase of nitrogen application. When the nitrogen application was constant, the $\text{NO}_3^- - \text{N}$ leaching loss and $\text{NO}_3^- - \text{N}$ leaching rate of 2014, 2015 would increase with the increase of irrigation quota. The crop needed sufficient $\text{NO}_3^- - \text{N}$ to absorb in root layer. The pollution of $\text{NO}_3^- - \text{N}$ leaching loss on the groundwater should be controlled in the safety range. Considering the two aspects above, this research recommended the W2N3 as the best water-nitrogen management pattern for experimental region.

Keywords: water-nitrogen management pattern; nitrogen application; irrigation quota; concentration of $\text{NO}_3^- - \text{N}$; $\text{NO}_3^- - \text{N}$ leaching loss

从 1978—2002 年, 内蒙古河套灌区的农田化肥用量由 7×10^4 t 迅速增长到 5.2×10^5 t, 氮肥施用强度在 2005 年已达到 361.86 kg/hm^2 ^[1]。多数国家地下水中的 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 浓度已显现出逐年递增的趋势^[2], $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 对地下水造成污染进而危害人体健康的问题受到国内外研究人员的广泛关注。因此, 研究人员在室内和田间开展了大量有关 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 淋溶累积的研究^[3-7]。在影响 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 淋溶的众多因素中, 灌水量和施氮量是极其关键的两个因素^[8-10]。已有研究表明, 1 m 土体内氮素淋失量与灌水量、施氮量呈极显著的正相关^[11]。而过量施氮导致的 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 残留和淋溶是造成地下水污染主要诱因^[12]。施氮量超过最佳施氮量时将导致收获后土壤 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 含量增加, 而不科学的水管理也会造成 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 的淋溶^[13]。灌水量越多, $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 淋失就越多^[14-15]。并且在高灌水量下 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 的累积量变化比低灌水量时大^[16]; 而小水量高频率的灌溉比大水量低频率灌溉会明显减少 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 的淋溶损失^[17]。土壤剖面中的 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 含量一定程度上能表征其污染地下水的潜力^[18], 而且灌水量和 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 运移深度之间关系密切, Sharma 等^[19]甚至发现 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 下移与水分移动相当一致。总体来讲, 前人研究的焦点主要集中在单一因素的不同水平对田间淋溶水中 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 浓度变化的影响, 并且对淋溶深度的研究较为宽泛。在不同水氮运筹的交互作用下, 对田间淋溶水中 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 时空分布特征的研究较少, 有待于进一步探究。本研究连续 2 年在河套灌区进行田间试验, 在不同水氮运筹模式下, 研究不同埋深内田间淋溶水中 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 的时空分布规律, 同时计算出作物收获后土壤中 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 的残

留损失量, 以期揭示 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 时空分布规律及减少 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 对地下水的潜在污染提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

试验于 2014—2015 年连续 2 年在内蒙古自治区磴口县坝楞村试验田进行, 该地位于内蒙古河套灌区上游, 属于温带大陆性季风气候, 海拔 1 048.7 m, 年均气温 $7.6 \text{ }^\circ\text{C}$, 年均降雨量 142.6 mm, 年均日照时数 3 206.5 h, 无霜期 136~144 d。试验地耕层土壤田间持水率 23.26%, 凋萎系数 7.36%, 有机质 11.6 g/kg。

1.2 试验设计

试验供试材料为春玉米西蒙 168。2014 年和 2015 年播种日期分别为 4 月 17 日和 4 月 29 日, 收获日期分别为 9 月 16 日和 9 月 18 日。试验采用裂区设计, 主区为灌水量, 设置 3 个灌水水平, 灌水定额分别为 525 (W1), 750 (W2), 975 (W3) m^3/hm^2 (表 1)。春玉米于拔节期, 大喇叭口期和灌浆期共灌 3 次水, 用潜水泵从渠道内抽水进行定量灌溉, 灌水量由水表控制。副区为施氮量, 设置 5 个水平, 分别为 0 (N0), 80 (N1), 160 (N2), 240 (N3), 320 (N4) kg/hm^2 。试验设置 15 个处理, 3 次重复, 随机排列, 各小区间设有 1 m 宽的隔离带。3 个对照处理只灌水不施肥。氮肥按 1:1 比例分别于播种期和第一次灌水前施入。磷肥、钾肥作为底肥一次性足量施入。

1.3 测定项目及方法

采用多孔 PVC 管测定法采集淋溶水样^[20]。用直径 5 cm 的 PVC 管制作田间淋溶水观测井。顶部预留 30 cm 高于地表, 防止灌水淹没; 底部预留 40 cm 收集淋溶水样, 每次灌水前将管内残留水样清空。在各处理小区内分别按照 0—40, 40—80, 80—120

cm 的深度埋置 3 个田间淋溶水观测井。在与埋深对应的管壁上打上分布均匀的小孔,孔径 5 mm,用 200 目的尼龙筛网包裹渗流区。每次灌水或降雨后 3~5 d 内采集淋溶水样,将试样瓶储存在 4 ℃ 冰箱内,24 h 内进行测试分析。玉米播种前和收获后,在各小区 80—120 cm 埋深内用土钻采集土样。采用双波长比色法和氯化钾溶液提取一分光光度法测定淋溶水样及土样中的硝态氮浓度^[20]。

表 1 试验处理设计

试验处理	基肥/ (kg · hm ⁻²)	追肥/ (kg · hm ⁻²)	灌水定额/ (m ³ · hm ⁻²)
W1N0	0	0	525
W1N1	40	40	525
W1N2	80	80	525
W1N3	120	120	525
W1N4	160	160	525
W2N0	0	0	750
W2N1	40	40	750
W2N2	80	80	750
W2N3	120	120	750
W2N4	160	160	750
W3N0	0	0	975
W3N1	40	40	975
W3N2	80	80	975
W3N3	120	120	975
W3N4	160	160	975

1.4 数据统计分析

采用 Excel 2003 软件进行数据统计及图表绘制,采用 SPSS 17.0 软件对试验数据进行多重比较分析。

2 结果与分析

2.1 不同水氮运筹模式对不同埋深淋溶水中硝态氮浓度的影响

2.1.1 不同水氮运筹模式对 0—40 cm 埋深淋溶水中硝态氮浓度的影响 如图 1 所示,2014,2015 年 3 种灌水定额下淋溶水中 NO₃⁻-N 浓度变化范围是 0~8.49 mg/L。总体来看,2 年内各处理在 0—40 cm 埋深的 NO₃⁻-N 浓度总体变化趋势基本一致,各处理 NO₃⁻-N 浓度值均在第 1 次灌水后达到峰值,随后便逐渐降低。呈现这一变化过程的主要原因是 NO₃⁻-N 与土壤离子均带负电荷,故难以被土壤胶体吸附,NO₃⁻-N 极易随着水分的运动而迁移。玉米的第 1 次灌水将播种时施入的基肥以及灌水前追入的氮肥进行了充分溶解,有大量的 NO₃⁻-N 作为溶质随水垂向入渗或水平运移,进而引发了各处理 NO₃⁻-N 浓度在第 1 次灌水后迅速出现峰值的现象。而且,在低灌水定额下,4 个施氮处理之间的 NO₃⁻-N 浓度值差异梯度较为均匀。而在中灌水定额和高灌水定额下,玉米第 1 次灌水后,W2N3、

W2N4 和 W3N3、W3N4 的 NO₃⁻-N 浓度明显与 W2N1、W2N2 和 W3N1、W3N2 拉开差距。这表明强度较高的灌溉与施肥可加快氮肥的溶解速率,进而显著升高土壤水中的 NO₃⁻-N 浓度^[21]。

对比 2 年第 1 次灌水前和灌水后的 NO₃⁻-N 浓度,W1 灌水定额下,不同施氮量处理的 NO₃⁻-N 浓度值增幅分别为 13.7%~26.9%(2014 年)和 22.6%~28.1%(2015 年);W2 灌水定额下,不同施氮量处理的 NO₃⁻-N 浓度值增幅分别为 20.5%~46.6%(2014 年)和 20.8%~51.7%(2015 年);W3 灌水定额下,不同施氮量处理的 NO₃⁻-N 浓度值增幅分别为 21.6%~47.5%(2014 年)和 24.8%~57.5%(2015 年)。N1 施氮量水平下,不同灌水定额处理的 NO₃⁻-N 浓度值增幅分别为 13.7%~21.6%(2014 年)和 20.8%~26.7%(2015 年);N2 水平下,不同灌水定额处理的 NO₃⁻-N 浓度值增幅分别为 18.2%~36.4%(2014 年)和 26.9%~41.2%(2015 年);N3 水平下,不同灌水定额处理的 NO₃⁻-N 浓度值增幅分别为 21.1%~47.5%(2014 年)和 22.6%~57.5%(2015 年);N4 水平下,不同灌水定额处理的 NO₃⁻-N 浓度值增幅分别为 26.9%~46.6%(2014 年)和 28.1%~54.5%(2015 年)。2 年中 NO₃⁻-N 浓度平均增幅最大的处理为 W3N3,其平均增幅为 52.5%;NO₃⁻-N 浓度平均值最高的处理为 W3N4,其 NO₃⁻-N 浓度平均值为 8.29 mg/L。

2.1.2 不同水氮运筹模式对 40—80 cm 埋深淋溶水中硝态氮浓度的影响 2014,2015 年 2 年 40—80 cm 埋深的 NO₃⁻-N 浓度变化范围是 0~4.83 mg/L(图 2)。与 0—40 cm 埋深的各处理相比,40—80 cm 埋深的各处理 NO₃⁻-N 浓度整体降低。但 NO₃⁻-N 浓度峰值出现的时间段与 0—40 cm 埋深的处理相一致,均是在玉米第 1 次灌水后。对比 40—80 cm 埋深不同灌水定额下的各处理发现,第 1 次灌水过后,低灌水定额各处理的 NO₃⁻-N 浓度呈现迅速下降趋势,而中高灌水定额各处理的 NO₃⁻-N 浓度下降曲线平缓,2014 年中高灌水定额的各施氮处理 NO₃⁻-N 浓度还在第 2 次灌水时有小幅度回升。这是由于灌溉量低导致耕作层的土壤含水量明显偏低,削弱了 NO₃⁻-N 运移的驱动力,进而降低了 NO₃⁻-N 在 40—80 cm 内的淋溶强度^[22]。而中高灌水量则加大了土壤水的淋溶强度,把更多的 NO₃⁻-N 从耕作层带入到 40—80 cm 埋深内^[23]。2015 年各处理并未出现 NO₃⁻-N 浓度回升的现象。在 40—80 cm 的埋深内,玉米的地下根系密度虽然低于 0—40 cm 内的根系密度,但在玉米生育中后期,根系因追寻水分及养分而向下延伸,所以在 40—80 cm 埋深内仍有相当数量的根系活跃,故运移到这一层内的 NO₃⁻-N 仍具有作物有效性。

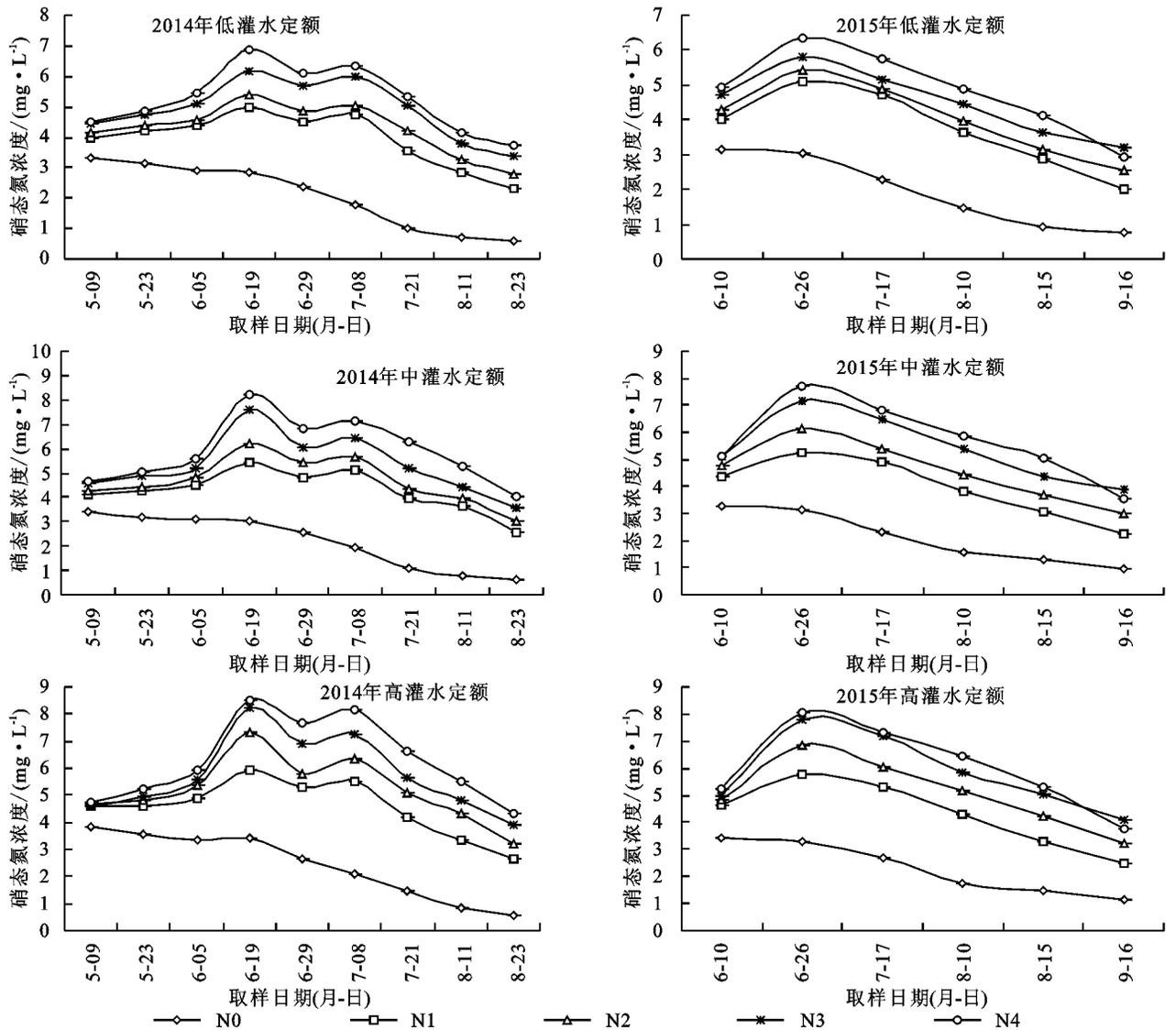


图1 2014、2015年不同水氮运筹模式下0—40 cm埋深 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 浓度变化特征

2.1.3 不同水氮运筹模式对80—120 cm埋深淋溶水中硝态氮浓度的影响 农学专家通常认为氮素被淋溶出作物根层范围即为淋溶损失;而环境学家则认为氮素进入地下水体方为淋溶损失。而玉米整个生育期内的主要根系层在地下0—80 cm埋深内,故80—120 cm埋深内的 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 可以被认为玉米根系活动层之下的淋失量,这部分 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 既不易被玉米根系吸收利用,又有可能在灌水降雨后被淋洗到更深层土壤或地下水中造成污染。

从图3可以看出,80—120 cm埋深内,在W1灌水定额下,2年的 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 浓度变化范围在0~2.33 mg/L;W2灌水定额下,2年的 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 浓度变化范围在0~2.78 mg/L;W3灌水定额下,两年的 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 浓度变化范围在0~3.08 mg/L。2014、2015年2年 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 浓度均在第1次灌水后呈现依次递减趋势。

2.2 不同水氮运筹模式对硝态氮淋溶损失量的影响 为计算出各处理土壤 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 淋失量,在玉米

播种前及收获后采集了各处理80—120 cm的土样。通过播种前及收获后土壤 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 的浓度差计算各处理的 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 淋失量^[24]。由表2可知,2014、2015年播种前,各处理间80—120 cm内的土壤 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 浓度差距不大。而伴随着各处理在玉米不同生育期内的灌水与施氮,收获后各处理80—120 cm内的土壤 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 浓度也逐渐显现出不同程度的差距。随着灌水量及施氮量的增加,土壤深层的 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 浓度也随之增加。过量的灌水会把更多的 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 淋溶到根系活动层之下,从而导致氮素的淋溶损失,降低了氮素利用率。

为了确定施氮量、灌水定额以及两者之间的交互作用是否对 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 淋失量有显著影响,对2014、2015年2年的各水氮处理 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 淋失量进行可重复双因素方差分析。由表3可知,施氮量、灌水定额以及施氮量×灌溉定额的 F 统计量均大于各自的 F 临界值。并且其 p 值 ≤ 0.01 ,这说明施氮量、灌水

定额以及两者的交互作用对 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 淋失量有极显著影响。运用多重比较中常用的最小显著差数

法对各处理土壤 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 淋失量的平均数进行多重比较。

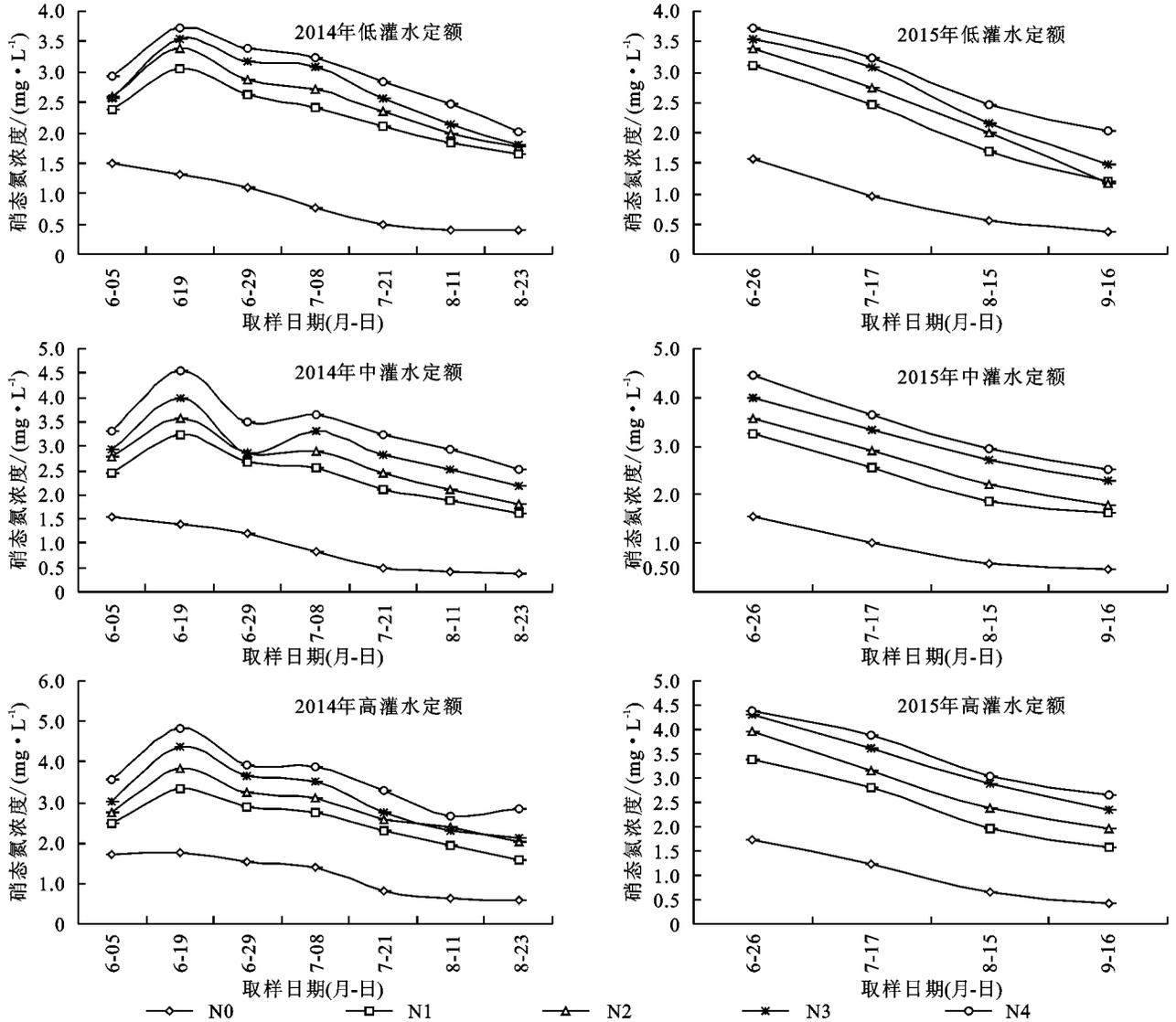


图 2 2014、2015 年不同水氮运筹下 40—80 cm 埋深 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 浓度变化特征

由表 4 可知,在 2014 年的 3 种不同灌水定额条件下,当灌水定额一定时,各个施氮量处理的 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 淋失量之间均呈现极显著性差异。2015 年当灌水定额为 W1 水平时,各施氮量处理的 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 淋失量之间有显著性差异, W1N3、W1N4 与 W1N2 和 W1N1 呈现极显著性差异。当灌水定额为 W2 水平时, W2N2 和 W2N3 之间差异不显著,但这两个处理与 W2N1、W2N4 均呈现极显著性差异。当灌水定额为 W3 水平时,各个施氮量处理的 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 淋失量之间均呈现极显著性差异。当施氮量为 N1 水平时,2014、2015 年 2 年间不同灌水定额处理的 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 淋失量差异不显著;当施氮量为 N2、N3、N4 水平时,不同灌水定额处理的 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 淋失量呈显著或极显著差异。而 2014、2015 年 2 年的 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 淋失率表现为当灌水定额一定时, $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 淋失率随着施氮量的增加而减少;当施氮量一定时, $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 淋失率随着

灌水定额的增加而增加。

3 讨论

在作物生育期内过量施用氮肥,导致大量氮素未被当季作物吸收利用而富集在土壤中。干旱地区硝化作用较强,残留在土壤中的无机氮主要以 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 的形式存在,极易随土壤水向下迁移,当 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 被淋溶到作物根区以下,就很难再被作物吸收利用。深层土壤反硝化过程微弱, $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 不易被转化为其它形态的氮,当其随水继续运移便构成了地下水污染的潜在威胁。一般来说,影响农田氮素淋溶损失的主要因素有降雨、灌溉、施肥状况、土壤性质、耕作方式、作物种类和种植方式等。本文主要探究了不同施氮量和灌水定额这 2 个主要因素,它们直接影响了土壤剖面中 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 的累积和水分的垂向运动,进而影响土壤溶液中 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 浓度。

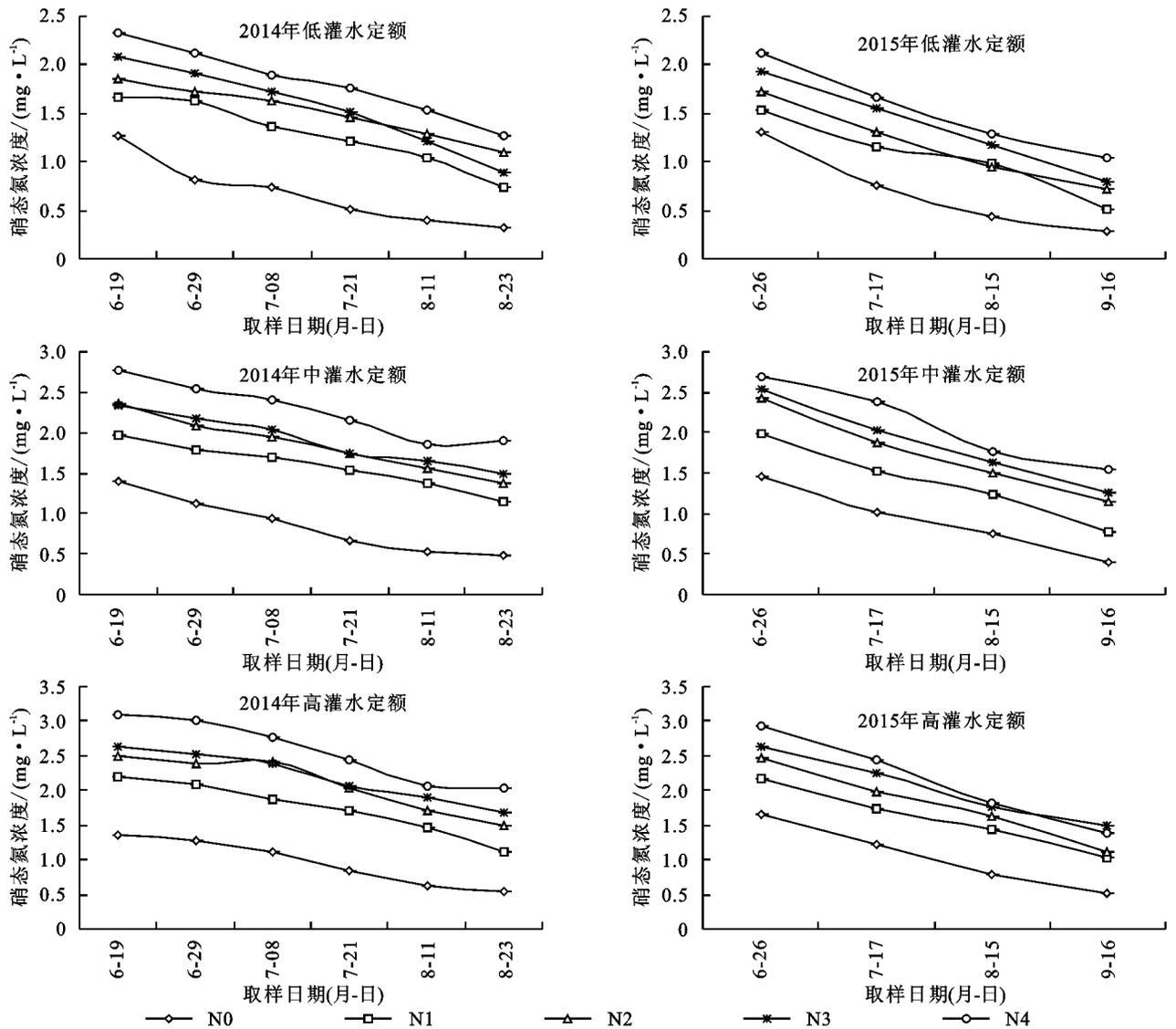


图 3 2014 年、2015 年不同水氮运筹下 80—120 cm 埋深 NO₃⁻-N 浓度变化特征

表 2 2014 年、2015 年不同水氮运筹模式下 80—120 cm 土壤 NO₃⁻-N 浓度 单位: mg/kg

处理	2014 年播种		2014 年收获		2015 年播种		2015 年收获	
	前土壤	后土壤	前土壤	后土壤	前土壤	后土壤	前土壤	后土壤
	硝态氮浓度	硝态氮浓度	硝态氮浓度	硝态氮浓度	硝态氮浓度	硝态氮浓度	硝态氮浓度	硝态氮浓度
W1N0	6.57±0.29	7.04±0.45	7.35±0.51	7.83±0.63	6.57±0.29	7.04±0.45	7.35±0.51	7.83±0.63
W1N1	6.39±0.34	7.33±0.39	7.78±0.27	8.69±0.35	6.39±0.34	7.33±0.39	7.78±0.27	8.69±0.35
W1N2	6.36±0.45	7.81±0.32	7.53±0.49	8.92±0.39	6.36±0.45	7.81±0.32	7.53±0.49	8.92±0.39
W1N3	6.26±0.37	8.40±0.73	7.96±0.43	10.02±0.42	6.26±0.37	8.40±0.73	7.96±0.43	10.02±0.42
W1N4	6.24±0.52	8.83±0.59	8.55±0.65	10.87±0.77	6.24±0.52	8.83±0.59	8.55±0.65	10.87±0.77
W2N0	6.30±0.33	6.86±0.44	7.80±0.34	8.38±0.43	6.30±0.33	6.86±0.44	7.80±0.34	8.38±0.43
W2N1	6.58±0.36	7.45±0.53	7.69±0.66	8.70±0.28	6.58±0.36	7.45±0.53	7.69±0.66	8.70±0.28
W2N2	5.76±0.55	7.98±0.67	8.41±0.32	10.67±0.85	5.76±0.55	7.98±0.67	8.41±0.32	10.67±0.85
W2N3	6.03±0.49	8.56±0.47	8.23±0.55	10.69±0.79	6.03±0.49	8.56±0.47	8.23±0.55	10.69±0.79
W2N4	5.63±0.32	9.23±0.83	8.99±0.74	12.28±0.96	5.63±0.32	9.23±0.83	8.99±0.74	12.28±0.96
W3N0	6.48±0.61	7.11±0.75	7.05±0.37	7.70±0.52	6.48±0.61	7.11±0.75	7.05±0.37	7.70±0.52
W3N1	6.52±0.43	7.67±0.55	8.11±0.61	9.23±0.47	6.52±0.43	7.67±0.55	8.11±0.61	9.23±0.47
W3N2	5.48±0.37	8.20±0.72	8.60±0.68	11.27±0.41	5.48±0.37	8.20±0.72	8.60±0.68	11.27±0.41
W3N3	5.51±0.26	8.97±0.64	8.49±0.58	11.98±0.85	5.51±0.26	8.97±0.64	8.49±0.58	11.98±0.85
W3N4	6.01±0.41	10.16±0.79	9.77±0.70	13.69±0.92	6.01±0.41	10.16±0.79	9.77±0.70	13.69±0.92

李宗新等^[25]在山东半湿润暖温带气候条件下研

究表明,在夏玉米生长期 NO₃⁻-N 累计淋溶量可占氮肥施入总量的 3.49%~11.35%,其与灌溉水量和降雨量呈正相关。还有研究表明,在灌溉后因自然排水而导致氮素淋失的前提下,氮素淋失量与灌溉水量呈显著正相关^[26-27]。本研究发现 2014,2015 年 2 年在春玉米生长期 NO₃⁻-N 累计淋溶量可占氮肥施入总量的 4.65%~9.80% 和 4.17%~9.60%,NO₃⁻-N 淋溶量和淋失率均随着灌溉定额的增加而增加,这与前人的研究成果相一致。还有研究表明,氮肥施用量也是影响氮素淋失的最重要因素之一,氮的淋失量与施氮量呈显著的正比例线性关系^[28-30],且低氮处理的氮素淋失率也极显著高于相应高氮处理^[25]。由表 4 可知,当灌水定额一定时,随着施氮量的增加,氮的淋失量也随之增加,而淋失率却呈现降低的趋势。玉米生育期内 3 种埋深下 NO₃⁻-N 浓度变化范围依次为 0~8.49 mg/L(0—40 cm),0~4.83 mg/L(40—80 cm)和 0~3.08 mg/L(80—120 cm),均低于 WHO 颁布的 10 mg/L 的标准。但河套灌区每年秋收翻地后会进行秋浇,秋浇后仍会有大量

残留于土壤中的 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 被淋溶至地下水中,所以地下水仍存在安全隐患。因此,提高作物对氮肥的利用

率,降低氮素的土壤残留,是减少 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 淋溶、防止地下水资源污染的重要前提。

表 3 2014、2015 年不同水氮运筹模式下土壤 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 淋失量可重复双因素方差分析

年份(年)	指标	SS	df	MS	F	p	F crit	显著性
2014	施氮量	964.63	3	321.54	746.70	8.07×10^{-24}	4.71	**
	灌水定额	238.19	2	119.09	276.56	2.67×10^{-17}	5.61	**
	施氮量×灌溉定额	65.30	6	10.88	25.27	2.94×10^{-9}	3.67	**
	内部	10.33	24	0.43				
	总计	1278.46	35					
2015	施氮量	771.79	3	257.26	302.69	3.38×10^{-19}	4.72	**
	灌水定额	255.36	2	127.68	150.22	2.68×10^{-14}	5.61	**
	施氮量×灌溉定额	71.29	6	11.88	13.98	8.45×10^{-7}	3.67	**
	内部	20.40	24	0.85				
	总计	1118.83	35					

注:表中 $F > F_{crit}$ 即表示该因素对试验影响显著, p 表示因素对于试验结果的无显著影响的概率。当 $p \leq 0.01$ 。则说明该因素对试验指标的响应呈极显著(**);当 $0.01 < p \leq 0.05$ 时,说明该因素对试验的指标呈显著性差异(*)。

表 4 2014、2015 年不同水氮运筹模式下土壤 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 淋失量及淋失率

处理	2014 年硝态氮淋失量/($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)	2014 年氮素淋失率/%	2015 年硝态氮淋失量/($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)	2015 年氮素淋失率/%
W1N0	2.68±0.14Ii		2.74±0.19Gh	
W1N1	5.41±0.29GHh	6.76	5.25±0.51Fg	6.56
W1N2	8.34±0.60Ff	5.21	7.98±0.54Ef	4.99
W1N3	12.33±0.26De	5.14	11.87±0.25De	4.95
W1N4	14.89±0.38Ccd	4.65	13.34±0.61Dd	4.17
W2N0	3.24±0.20Ii		3.35±0.29Gh	
W2N1	5.02±0.47Hh	6.28	5.79±0.30Fg	7.24
W2N2	12.77±1.75De	7.98	13.03±2.04Dde	8.14
W2N3	14.56±0.29Cd	6.07	14.16±0.27CDcd	5.90
W2N4	20.75±0.32Bb	6.48	18.95±1.57Bb	5.92
W3N0	3.63±0.17Ii		3.72±0.23Gh	
W3N1	6.65±0.63Gg	8.31	6.46±0.22EFg	8.08
W3N2	15.68±0.55Cc	9.80	15.37±0.42Cc	9.60
W3N3	19.92±0.51Bb	8.30	20.12±0.77Bb	8.38
W3N4	23.92±0.28Aa	7.48	22.58±1.28Aa	7.06

注:氮素淋失率为各处理氮素(硝态氮)淋失量与施氮量的比率。不同大小写字母分别表示差异达 0.01 和 0.05 显著水平。

4 结论

(1)对比 2014、2015 年 2 年间玉米第 1 次灌水前后各处理 0—40 cm 埋深内淋溶水中 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 浓度,当灌水定额为 W1 水平时,随着施氮量的增加,各处理 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 浓度的平均增幅为 20.2%~27.5%,远低于 W2 和 W3 水平的 20.65%~49.15% 和 23.2%~52.5% 的 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 浓度的平均增幅。当施氮量为 N1、N2 水平时,随着灌水定额的增加,各处理 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 浓度值的平均增幅为 17.25%~24.15% 和 22.55%~38.8%,远低于当施氮量为 N3、N4 水平时,21.85%~52.5% 和 27.5%~50.55% 的平均增幅。40—80 cm 埋深和

80—120 cm 埋深的各处理淋溶水中 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 浓度均在第 1 次灌水后呈现整体下降趋势。

(2)施氮量、灌水定额以及两者的交互作用对 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 淋失量的影响呈极显著。当灌水定额一定时,高施氮量处理的 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 淋失量高于低施氮量处理的 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 淋失量,并且呈极显著性差异。当施氮量为 N1 水平时,不同灌水定额处理的 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 淋失量差异不显著;当施氮量为 N2、N3、N4 水平时,不同灌水定额处理的 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 淋失量呈显著或极显著差异。

(3)2014、2015 年 2 年的 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 淋失量和淋失率表现为当灌水定额一定时, $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 淋失量随着施氮量增加而增加,淋失率随着施氮量的增加而减少;当施氮量一定时, $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 淋失量及淋失率均随着灌水定额的增加而增加。

(4)鉴于根层内需要充足的 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 以被玉米吸收,还要保证根区外 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 淋失量对地下水的污染在可控安全范围内。而 W2N3 处理在 0—40 cm 及 40—80 cm 内淋溶水中的 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 浓度相对较高,在 80—120 cm 内土壤 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 淋失量较少,淋失率相对较低。故推荐 W2N3 为适用于当地的水氮运筹模式。

参考文献:

- [1] 杜军,杨培岭,李云开,等.灌溉、施肥和浅水埋深对小麦产量和硝态氮淋溶损失的影响[J].农业工程学报,2011,27(2):57-64.
- [2] Thorburn P J, Biggs J S, Weier K L, et al. Nitrate in groundwater of intensive agricultural areas in coastal northeastern Australia[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2003, 94(1): 49-58.
- [3] 宋海星,李生秀.根系的吸收作用及土壤水分对硝态氮、铵

- 态氮分布的影响[J]. 中国农业科学, 2005, 38(1): 96-101.
- [4] 商放泽, 杨培岭, 李云开, 等. 不同施氮水平对深层包气带土壤氮素淋溶累积的影响[J]. 农业工程学报, 2012, 28(7): 103-110.
- [5] 商放泽, 杨培岭, 任树梅. 水氮量对层状包气带土壤氮素迁移累积的影响分析[J]. 农业机械学报, 2013, 44(10): 112-121.
- [6] Perego A, Basile A, Bonfante A, et al. Nitrate leaching under maize cropping systems in Po Valley (Italy)[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2012, 147(1): 57-65.
- [7] Nettleton W D, Peterson F F. Landform, soil and plant relationships to nitrate accumulation, central Nevada [J]. *Geoderma*, 2011, 160(3/4): 265-270.
- [8] Zhao B Q, Li X Y, Liu H, et al. Results from long-term fertilizer experiments in China: The risk of groundwater pollution by nitrate [J]. *NJAS-Wageningen Journal of Life Sciences*, 2011, 58(3/4): 177-183.
- [9] Sharma P, Shukla M K, Sammis T W, et al. Nitrate-nitrogen leaching from three specialty crops of New Mexico under furrow irrigation system [J]. *Agricultural Water Management*, 2012, 109(6): 71-80.
- [10] 陈效民, 吴华山, 孙静红. 太湖地区农田土壤中铵态氮和硝态氮的时空变异[J]. 环境科学, 2006, 27(6): 1217-1222.
- [11] 高如泰, 陈焕伟, 李保国, 等. 黄淮海平原冬小麦生长期土壤水氮利用效率模拟分析[J]. 中国农业科学, 2006, 39(3): 552-562.
- [12] 胡玉婷, 廖千家骅, 王书伟, 等. 中国农田氮淋失相关因素分析及总氮淋失量估算[J]. 土壤, 2011, 43(1): 19-25.
- [13] 叶优良, 李隆. 水氮量对小麦/玉米间作土壤硝态氮累积和水氮利用效率的影响[J]. 农业工程学报, 2009, 25(1): 33-39.
- [14] 徐力刚, 王晓龙, 崔锐, 等. 不同农业种植方式对土壤中硝态氮淋失的影响研究[J]. 土壤, 2012, 42(2): 225-231.
- [15] 闫鹏, 武雪萍, 华璐, 等. 不同水氮用量对日光温室黄瓜季土壤硝态氮淋失的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2012, 18(3): 645-653.
- [16] 叶优良, 李隆, 张福锁, 等. 灌溉对大麦/玉米带田土壤硝态氮累积和淋失的影响[J]. 农业工程报, 2004, 20(5): 105-109.
- [17] Vázquez N, Pardo A, Susoa M L, et al. Drainage and nitrate leaching under processing tomato growth with drip irrigation and plastic mulching [J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2006, 112(4): 313-323.
- [18] 杨治平, 陈明昌, 张强, 等. 不同施氮措施对保护地黄瓜养分利用效率及土壤氮素淋失影响[J]. 水土保持学报, 2007, 21(2): 57-60.
- [19] Sharma S K, Manchanda H R. Influence of leaching with different amount of water on desalinization and permeability: Behavior of chloride and sulphate-dominated saline soils [J]. *Agricultural Water Management*, 1996, 31(3): 225-235.
- [20] 邵东国, 过龙根, 王修贵, 等. 水肥资源高效利用[M]. 北京: 科学出版社, 2012: 56-58.
- [21] 宋效宗, 赵长星, 李季, 等. 两种种植体系下地下水硝态氮含量变化[J]. 生态学报, 2008, 28(11): 5513-5520.
- [22] 王辉, 王全九, 邵明安. 降水条件下黄土坡地氮素淋溶特征的研究[J]. 水土保持学报, 2005, 19(5): 61-64.
- [23] 左海军, 张奇, 徐力刚, 等. 基于数值模拟的土壤水渗漏对降雨条件的响应[J]. 水土保持学报, 2009, 23(1): 31-35.
- [24] 吴永成, 周顺利, 王志敏, 等. 华北地区夏玉米土壤硝态氮的时空动态与残留[J]. 生态学报, 2005, 25(7): 1620-1625.
- [25] 李宗新, 董树亭, 王空军, 等. 不同施肥条件下玉米田土壤养分淋溶规律的原位研究[J]. 应用生态学报, 2008, 19(1): 65-70.
- [26] Poch M R, Jimenez M J, Wallis K J, et al. Irrigation return flow and nitrate leaching under different crops and irrigation methods in western mediterranean weather conditions [J]. *Agricultural Water Management*, 2014, 134(3): 1-13.
- [27] Kong D L, Lü X T, Jiang L L, et al. Extreme rainfall events can alter inter-annual biomass responses to water and N enrichment [J]. *Biogeosciences*, 2013, 12(10): 8129-8138.
- [28] Armour J D, Nelson P N, Daniells J W. Nitrogen leaching from the root zone of sugarcane and bananas in the humid tropics of Australia [J]. *Agriculture Ecosystems and Environment*, 2013, 180(SD): 68-78.
- [29] Jalali M. Nitrates leaching from agricultural land in Hamadan, western Iran [J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2005, 110(3/4): 210-218.
- [30] Dahan O, Babad A, Lazarovitch N, et al. Nitrate leaching from intensive organic farms to groundwater [J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2014, 18(1): 333-341.