

小麦-玉米轮作期间不同施肥处理氮素的淋溶形态及数量

高忠霞^{1,2}, 杨学云¹, 周建斌¹, 王 祥¹, 王 宏³

(1.西北农林科技大学资源环境学院, 陕西 杨凌 712100; 2.榆林市环境科技咨询服务部, 陕西 榆林 719000; 3.榆林市水务局, 陕西 榆林 719000)

摘 要:利用大型回填土渗漏池研究了陕西关中平原小麦-玉米轮作年生长周期内壤土不同施肥处理氮素淋溶的动态变化。结果表明,小麦-玉米期间土壤淋溶的氮素以硝态氮(NO_3^- -N)为主,溶解性有机氮(DON)次之,铵态氮(NH_4^+ -N)最低,占淋失总氮的比例平均分别为 72.1%、26.2%和 1.7%,说明除 NO_3^- -N 外,DON 也是不可忽视的土壤氮素淋失形态。与施氮磷化肥(NP)相比,氮磷化肥和有机肥配施处理(NPM)明显降低了淋溶到 100 cm 深度土层的氮量;在小麦-玉米生长期间,NPM 处理 NO_3^- -N、DON 和 NH_4^+ -N 的累积淋溶量比 NP 处理分别降低了 64.4%、42.9%和 54.8%,这与配施有机肥后提高了土壤的持水保肥能力有关,说明有机肥与化肥合理配合施用可以降低氮素的淋溶损失。

关键词:小麦-玉米轮作;施肥;氮素淋溶;溶解性有机氮

中图分类号:X522 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2010)08-1624-09

Forms and Amounts of Nitrogen in Leachates Affected by Different Fertilizations after one Wheat-maize Rotation

GAO Zhong-xia^{1,2}, YANG Xue-yun¹, ZHOU Jian-bin¹, WANG Xiang¹, WANG Hong³

(1.College of Resources & Environment Sciences, Northwest A&F University, Yangling 712100, China; 2.Department of Consultation Service on Environmental Science and Technology Yulin City, Yulin 719000, China; 3.Water Affairs Bureau Yulin City, Yulin 719000, China)

Abstract: Nitrogen(N) leaching from soils results in low N use efficiency and environment deterioration. Lysimeters was constructed at the south edge of the Loess Plateau locating in the Guanzhong Plain, Shaanxi, China to evaluate the forms and amounts of nitrogen in the leachates under fertilizations during a wheat-maize rotation between 2007 and 2008. The fertilization treatments were (1) no fertilizer as the control, (2) inorganic N and phosphorus(P) fertilizers(NP), and (3) NP + organic manure(NPM). Nitrogen amounts leached from the soil during the wheat-maize rotation were greater as the NO_3^- -N form, next as the dissolved organic nitrogen(DON), and lowest as the NH_4^+ -N. The ratios of NO_3^- -N, DON and NH_4^+ -N to the total N(NO_3^- -N, NH_4^+ -N plus DON) leached were 72.1%, 26.2% and 1.7%, respectively. These results indicated that DON was also an important N source for potential use by plants. Furthermore, the amounts of leached NO_3^- -N, DON and NH_4^+ -N were significantly higher in the NP fertilization than in the non-fertilizer control. In contrast, compared to the NP treatment during the wheat-maize growth period, the amounts of leached NO_3^- -N, DON and NH_4^+ -N were significantly decreased by 64.4%, 42.9% and 54.8% respectively at the 100 cm soil depth in the NPM fertilization. Our results indicated that such decreased N loss from leachates as a result of the application of inorganic fertilizer with organic manure could potentially mitigate NO_3^- -N release to the environment and also enhance N use efficiency by plants.

Keywords: wheat-maize rotation; fertilization; nitrogen leaching; dissolved organic nitrogen(DON)

收稿日期:2010-03-16

基金项目:国家“十一五”科技支撑计划课题(2007BAD89B02);国家自然科学基金(40773057);西北农林科技大学拔尖人才支持计划(2006)

作者简介:高忠霞(1982—),女,陕西神木人,硕士,助理工程师,主要从事土壤可溶性有机碳、氮方面的研究和环境影响评价工作。

E-mail:zhongxiagao@126.com

通讯作者:周建斌 E-mail:jzhou@nwsuaf.edu.cn

我国化肥年用量已居世界首位, 且仍在不断增加。施入农田的氮肥, 当季被作物利用的仅有 30%~40%, 其余的通过氨挥发、硝化-反硝化、渗漏和径流等多种途径损失^[1-2]。据报道, 施入农田中的氮肥大约有 5%~41.9% 通过淋溶进入地下水^[3], 这不仅造成了巨大的经济损失, 也给我国业已脆弱的生态环境带来了巨大的压力。

因此, 土壤氮素淋溶的研究已成为农业和环境科学关注的热点和重要问题。如何采用有效的方法评价氮素的淋溶损失, 是研究这一问题的重要环节^[4]。近年来, 国际上主要采用的方法有排水采集器法和多孔杯法, 但大部分研究是在实验室模拟条件下进行的^[5-6], 田间原位条件下的研究相对较少; 国内对土壤氮素淋溶的研究多侧重于南方水田^[7-8]和土柱模拟^[9-11]试验方面, 主要采用土壤剖面样品分析的方法进行研究; 对我国北方地区土壤氮素淋溶的研究多集中在硝态氮方面^[12-13], 对其他形态氮素, 尤其是有机态氮在氮素淋溶方面作用的研究尚少见报道。国外几年来的研究发现, 溶解性有机氮是氮素从土壤生态系统流失的主要形态之一^[14-18], 因此, 有必要评价这种形态氮素在我国北方小麦-玉米轮作体系中氮素淋溶损失方面的作用。

为此, 本试验利用田间渗漏池方法, 研究了陕西关中地区冬小麦-夏玉米轮作体系下不同施肥处理农田土壤不同形态氮素[包括溶解态有机氮(DON)、硝态氮(NO₃-N)和铵态氮(NH₄⁺-N)]的淋溶特性, 以期氮肥的合理施用及生态环境保护提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验地点

试验在位于黄土高原南部的陕西杨凌“国家黄土肥力与肥料效益监测基地”的渗漏池群进行, 该基地地处渭河三级阶地, 海拔 524.7 m, 年均气温 13 ℃, 年均降水量约 630 mm, 地下水位埋深在 26~38 m 之间。

试验用渗漏池建于 1989 年, 为钢筋混凝土结构, 内径 100 cm, 设 50、80、100 cm 不同深度, 为扰动回填土, 按自然土壤发生层次和容重分层装土, 底部为石英砂颗粒, 其上覆盖一层石棉布, 装有 PVC 管(直径约 2.5 cm)用以承接渗滤液。回填土壤属褐土类壤土亚类, 红油土属, 厚层红油土种, 黄土母质。至本试验开始时(2007 年 11 月)渗漏池历经 15 a 种植, 已基本接近自然土壤状态, 土壤容重 1.30 g·cm⁻³, 孔隙率 49.6%, 质地重壤^[19]。渗漏池实行冬小麦-夏玉米轮作制, 一年两熟。

1.2 试验设计

试验选用的不同深度渗漏池(50、80、100 cm)设置的肥料处理不同, 其中 50 cm 和 80 cm 渗漏池, 设对照(CK)和施氮磷肥(NP)两个处理; 100 cm 渗漏池设施氮磷肥(NP)和氮磷肥配施有机肥(NPM)两个处理。由于渗漏池数量限制, 除 50 cm 渗漏池和 80 cm 渗漏池的不施肥(CK)处理以及 100 cm 渗漏池施氮磷肥处理重复 2 次外, 其余均重复 3 次。氮肥施用量为 180 kgN·hm⁻²(尿素); 磷肥用量为 144 kgP₂O₅·hm⁻²(过磷酸钙, 16% P₂O₅); 有机肥施用牛粪, 用量为 45 t·hm⁻²。氮肥和磷肥每季(小麦种植时, 玉米种后 1 个月内)施用, 有机肥每年在秋季小麦种植时一次施入。试验期间测得不同施肥处理 0~80 cm 土层的全氮、有机质含量见表 1。

研究于 2007 年 11 月开始, 至 2008 年 10 月结束, 历经冬小麦-夏玉米两个生长季节。试验期间根据降雨量情况(图 1)共灌水 6 次, 每次灌水量为 600 m³·hm⁻²(相当于 60 mm 降雨量), 灌溉日期分别为 2008-01-08、2008-04-01、2008-05-16、2008-06-25、2008-07-12 和 2008-08-06。

1.3 渗滤液的采集

试验期间连续收集不同渗漏池的淋出液, 由于降雨和灌溉量的变化, 获得渗滤液间隔的时间存在差异。每次获得渗滤液后, 先量其体积并取样 500 mL,

表 1 渗漏池不同处理不同土层土壤全氮、有机质的含量

Table1 Effects of fertilizations on soil total nitrogen and organic matter contents at different lysimeter depths

土层 Soil layer/cm	对照(CK)		氮肥+磷肥(NP)		氮肥+磷肥+有机肥(NPM)	
	全氮 Total nitrogen/ g·kg ⁻¹	有机质 Organic matter/g·kg ⁻¹	全氮 Total nitrogen/ g·kg ⁻¹	有机质 Organic matter/g·kg ⁻¹	全氮 Total nitrogen/ g·kg ⁻¹	有机质 Organic matter/g·kg ⁻¹
0~20	0.91	11.80	1.00	11.83	1.12	14.62
20~40	0.65	9.02	0.72	9.04	0.81	9.88
40~60	0.52	8.00	0.69	7.99	0.72	7.10
60~80	—	—	0.60	7.81	0.63	7.46

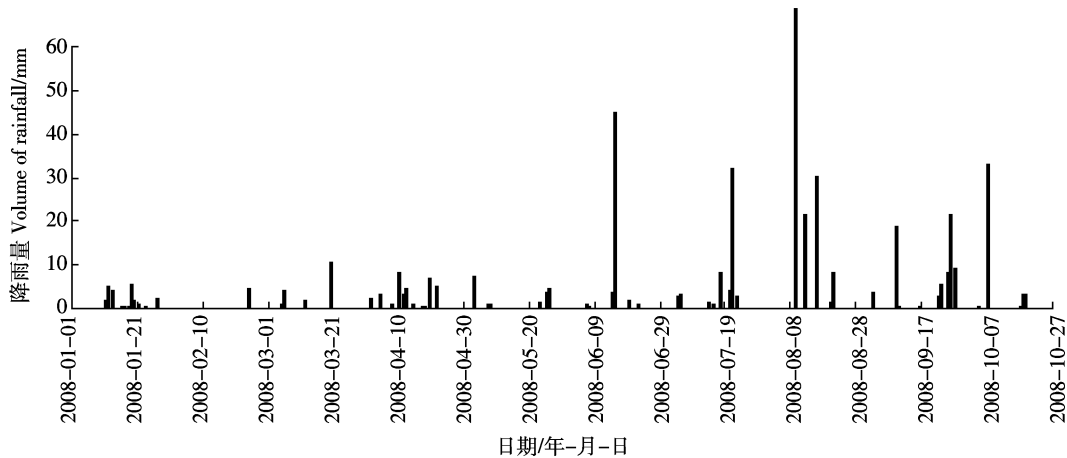


图1 小麦-玉米生长期降雨量

Figure 1 Rainfall during the growth season of wheat-maize rotation in 2008

带回实验室过 $0.45\ \mu\text{m}$ 滤膜,测定其中全氮(TDN)、溶解性有机氮(DON)、硝态氮($\text{NO}_3\text{-N}$)和铵态氮($\text{NH}_4\text{-N}$)含量(于收集当日测定或过滤后 $4\ ^\circ\text{C}$ 贮存)。试验期间共采样9次,日期分别为:2007-11-24、2008-01-15、2008-03-06、2008-04-15、2008-05-23、2008-07-19、2008-08-11、2008-09-02和2008-10-21。

1.4 测定与计算方法

土壤有机质采用重铬酸钾氧化-外加热法测定,全氮采用开氏法测定^[20]。淋溶液中的 $\text{NO}_3\text{-N}$ 、 $\text{NH}_4\text{-N}$ 采用连续流动分析仪测定,TDN 采用碱性过硫酸钾氧化比色法测定^[21-22];DON 由 TDN 与无机氮($\text{NO}_3\text{-N} + \text{NH}_4\text{-N}$)的差值求得;表观淋溶率(%)=氮素淋溶量 $\times 100$ /氮肥施用量;净淋溶率(%)=(施氮处理的氮素淋溶量-不施氮处理的氮素淋溶量) $\times 100$ /氮肥施用量^[23-24]。

2 结果与分析

2.1 不同深度土壤渗滤液量动态变化

由图2可知,50、80、100 cm 深度渗漏池各处理的渗滤液量均在前3次取样期间呈升高趋势,这既与灌水有关,也与土壤温度回升、土壤水垂直入渗增强^[25]有关。此后各处理不同深度渗滤液量出现峰值主要与取样前期的灌水和降雨有关。

从渗滤液累积量看,50 cm 和 80 cm 深度渗漏池 CK 处理渗滤液的总量分别为 $155\ \text{L}\cdot\text{池}^{-1}$ 和 $130\ \text{L}\cdot\text{池}^{-1}$,而相应的 NP 处理渗滤液总量分别为 $72\ \text{L}\cdot\text{池}^{-1}$ 和 $53\ \text{L}\cdot\text{池}^{-1}$,可见,施用氮磷肥显著降低了渗滤液的总量。100 cm 渗漏池 NP 处理渗滤液的总量为 $38\ \text{L}\cdot\text{池}^{-1}$,而 NPM 处理的为 $18\ \text{L}\cdot\text{池}^{-1}$,说明增施有机肥也

降低了土壤渗滤液的总量。

从渗滤液的动态变化看,与 CK 处理不同,NP 处理在 50、80、100 cm 深度渗漏池以及 NPM 处理在 100 cm 深度渗漏池的渗滤液量均在 2008 年 4 月 15 日取样出现谷值,主要由于这一阶段小麦处于快速生长的拔节期,施肥处理的小麦生长相对 CK 处理旺盛,蒸腾作用强;与 NP 处理不同,CK 处理在 50 cm 和 80 cm 深度处渗滤液量在 2008 年 5 月 23 日取样并未因之前的降雨和灌水出现峰值,主要由于这时期 CK 处理小麦长势差,地表裸露部分较 NP 处理多,地面蒸发作用强所致;与 CK 处理相比,7—10 月 NP 处理在土壤 50 cm 和 80 cm 深度渗漏池的渗滤液量明显降低,主要由于施肥处理玉米生长旺盛,蒸腾作用强,减少了土壤水下渗量。

2.2 不同深度土壤渗滤液中不同形态氮浓度的动态变化

2.2.1 50 cm 深度各形态氮浓度的动态变化

50 cm 深度渗漏池 CK 和 NP 处理渗滤液中 $\text{NO}_3\text{-N}$ 浓度的变幅分别为 $0\sim 7.12$ 、 $5.51\sim 48.68\ \text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$,平均分别为 2.53 、 $22.25\ \text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$;DON 浓度的变幅分别为 $0.03\sim 2.97$ 、 $0\sim 21.08\ \text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$,平均分别为 0.91 和 $5.37\ \text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$; $\text{NH}_4\text{-N}$ 浓度的变幅分别为 $0.01\sim 0.18$ 、 $0.01\sim 0.62\ \text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$,平均分别为 0.10 、 $0.18\ \text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ (图3)。可见,NP 处理显著增加了土壤 50 cm 深度渗漏池渗滤液中不同形态氮素的浓度。

从渗滤液中不同形态氮素浓度的动态变化看,CK 处理渗滤液中 $\text{NO}_3\text{-N}$ 和 DON 的浓度均在前5次取样时变化较为平缓,到 2008 年 7 月 19 日第6次取样达最高,随后呈降低趋势; $\text{NH}_4\text{-N}$ 的浓度在整个时

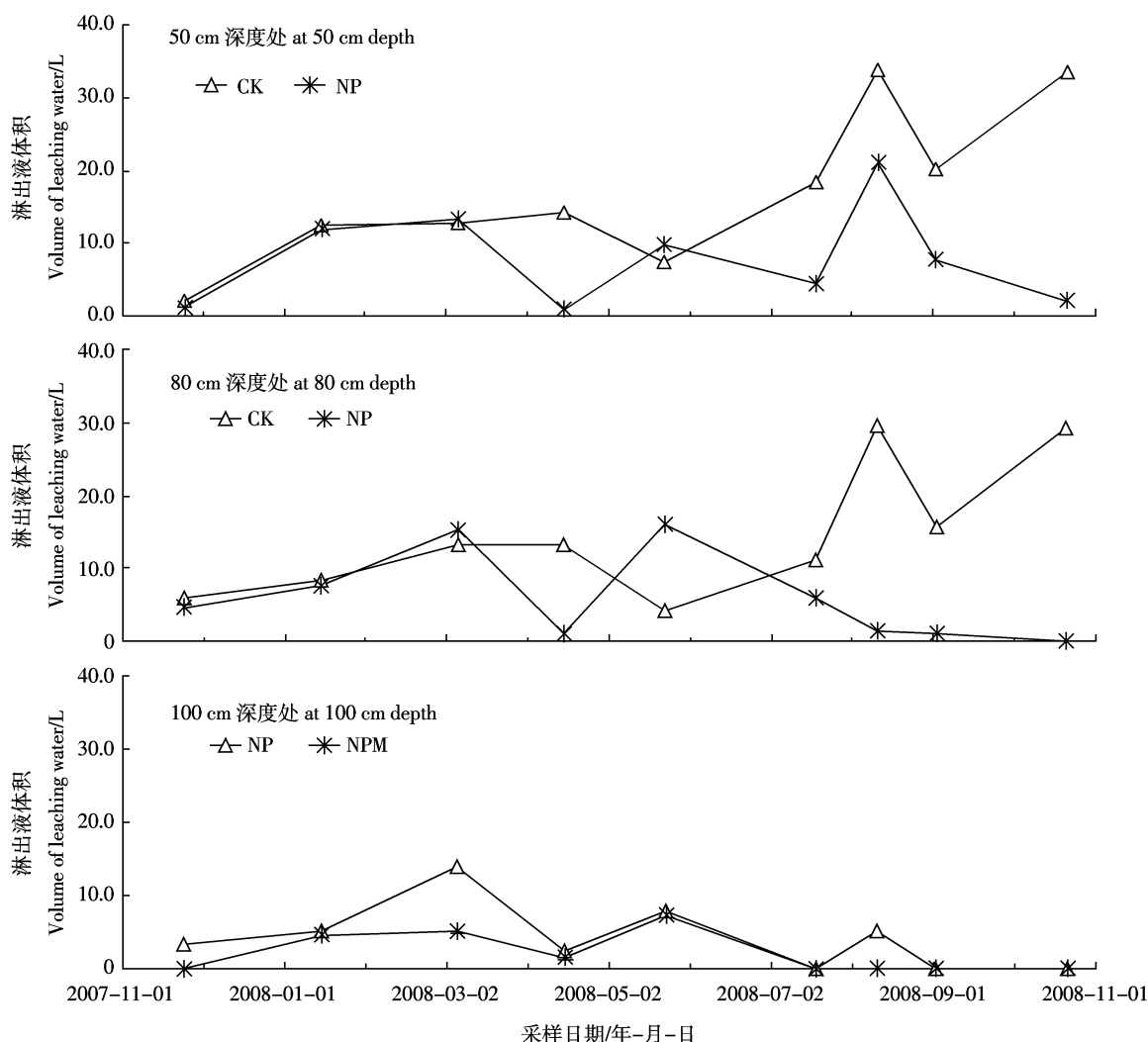


图2 小麦-玉米生长期间不同深度渗滤池渗滤液量的动态变化

Figure 2 Dynamics of leachates at different lysimeter depths during one wheat-maize rotation

期呈降低趋势。NP 处理渗滤液中 NO_3^--N 和 DON 的浓度均在 2008 年 1 月 15 日第 2 次取样出现淋出峰, 此后呈降低趋势, 至 7 月 19 日第 6 次取样 NO_3^--N 的浓度出现第 2 次淋出峰。 NH_4^+-N 的浓度在前 3 次取样变化平缓, 在 2008 年 4 月 15 日第 4 次取样升至最高, 随后呈降低趋势。

2.2.2 80 cm 深度各形态氮浓度的动态变化

80 cm 深度渗滤池 CK 和 NP 处理渗滤液中 NO_3^--N 浓度的变幅分别为 0.21~3.82、0~21.13 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 平均分别为 1.28、9.60 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$; DON 浓度的变幅分别为 0.03~3.69、0~16.90 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 平均分别为 0.66、4.67 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$; NH_4^+-N 浓度的变幅分别为 0~0.20、0~0.47 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 平均分别为 0.08、0.15 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ (图 4)。可见, NP 处理显著增加了渗滤液中不同形态氮素的浓度。

CK 处理渗滤液中 NO_3^--N 和 DON 的浓度均在前

5 次取样时变化较为平缓, 到 2008 年 7 月 19 日第 6 次取样达最高, 随后呈降低趋势; NH_4^+-N 浓度在整个时期呈降低趋势。NP 处理渗滤液中 NO_3^--N 和 DON 的浓度均在 2008 年 1 月 15 日第 2 次取样出现淋出峰, 此后呈降低趋势, 至 7 月 19 日第 6 次取样出现一个较弱的淋出峰; NH_4^+-N 浓度在前 3 次取样变化平缓, 在 2008 年 4 月 15 日第 4 次取样升至最高, 随后呈降低趋势。

2.2.3 100 cm 深度各形态氮浓度的动态变化

100 cm 深度渗滤池 NP 处理和 NPM 处理渗滤液中 NO_3^--N 浓度的变幅分别为 0~10.87、0~7.66 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 平均分别为 5.01、2.28 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$; DON 浓度的变幅分别为 0~4.11、0~3.22 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 平均分别为 1.94、1.06 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$; NH_4^+-N 浓度的变幅分别为 0~0.32、0~0.28 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 平均分别为 0.12、0.09 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ (图 5)。可见, NPM 处理

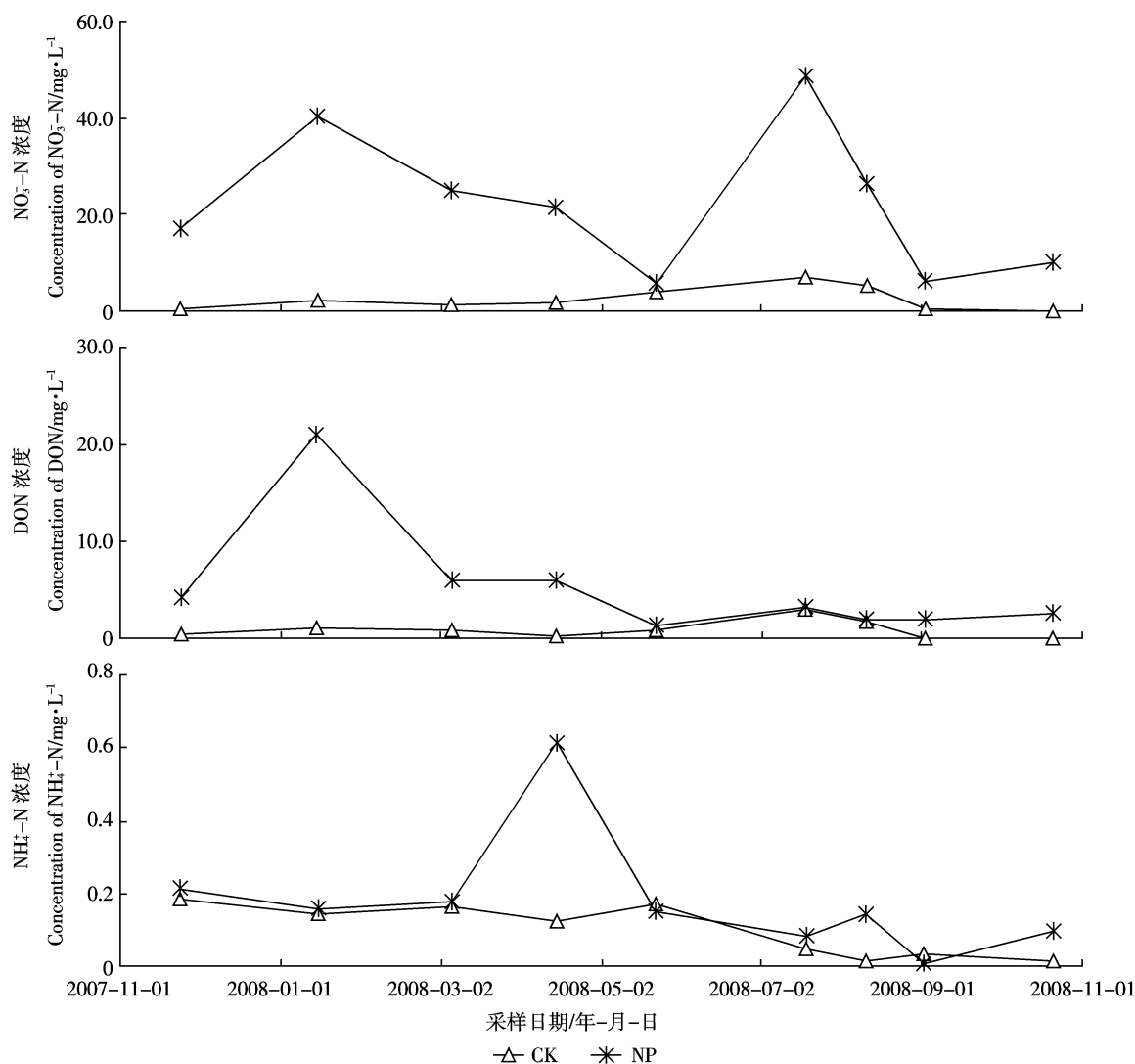


图3 小麦-玉米生长期期间 50 cm 深渗漏池渗滤液中各形态氮浓度的动态变化

Figure 3 Dynamics of NO₃-N, NH₄⁺-N and DON in leachates of the 50 cm lysimeter during one wheat-maize rotation

与 NP 处理相比,明显降低了 100 cm 深度渗漏池渗滤液中不同形态氮素的浓度。

NP 处理渗滤液中 NO₃-N 和 DON 的浓度均在 2008 年 1 月 15 日第 2 次取样出现淋出峰,此后呈降低趋势,至 8 月 11 日第 7 次取样出现第 2 次淋出峰,随后呈降低趋势。NH₄⁺-N 的浓度在前 3 次取样变化平缓,在 2008 年 4 月 15 日第 4 次取样升至最高。NPM 处理渗滤液中 NO₃-N 和 NH₄⁺-N 的浓度均在 2008 年 3 月 6 日第 3 次取样出现淋出峰;DON 的浓度在 2008 年 1 月 15 日第 2 次取样出现淋出峰。

2.3 不同形态氮的累积淋溶量和淋溶率

由表 2 可知,小麦-玉米生长期间不同深度渗漏池 NO₃-N 的淋溶量变幅为 1.17~22.12 kg·hm⁻²,平均为 7.15 kg·hm⁻²,占淋溶总氮的比例为 66.4%~80.7%,平

均为 72.1%;DON 的淋溶量变幅为 0.52~5.17 kg·hm⁻²,平均为 2.29 kg·hm⁻²,占淋溶总氮的比例在 18.7%~32.6%,平均为 26.2%;NH₄⁺-N 的淋溶量变幅在 0.04~0.13 kg·hm⁻²,平均为 0.09 kg·hm⁻²,占淋溶总氮的比例在 0.5%~3.0%,平均为 1.7%。不同深度渗漏池不同处理的 3 种形态氮素的淋溶量表现出 NO₃-N>DON>NH₄⁺-N。

与 CK 处理相比,尽管 NP 处理均明显降低了淋出 50 cm 和 80 cm 深土体的渗滤液总量(图 2),但由于增加了渗滤液中不同形态氮的浓度(图 3,图 4),从而增加了相应深度处 NO₃-N 及 DON 的淋溶量。100 cm 深度渗漏池 NP 与 NPM 两处理相比,增施有机肥不仅显著降低了渗滤液的总量,而且使 NO₃-N、DON 和 NH₄⁺-N 的浓度有所降低,与 NP 处理相比,NPM 处

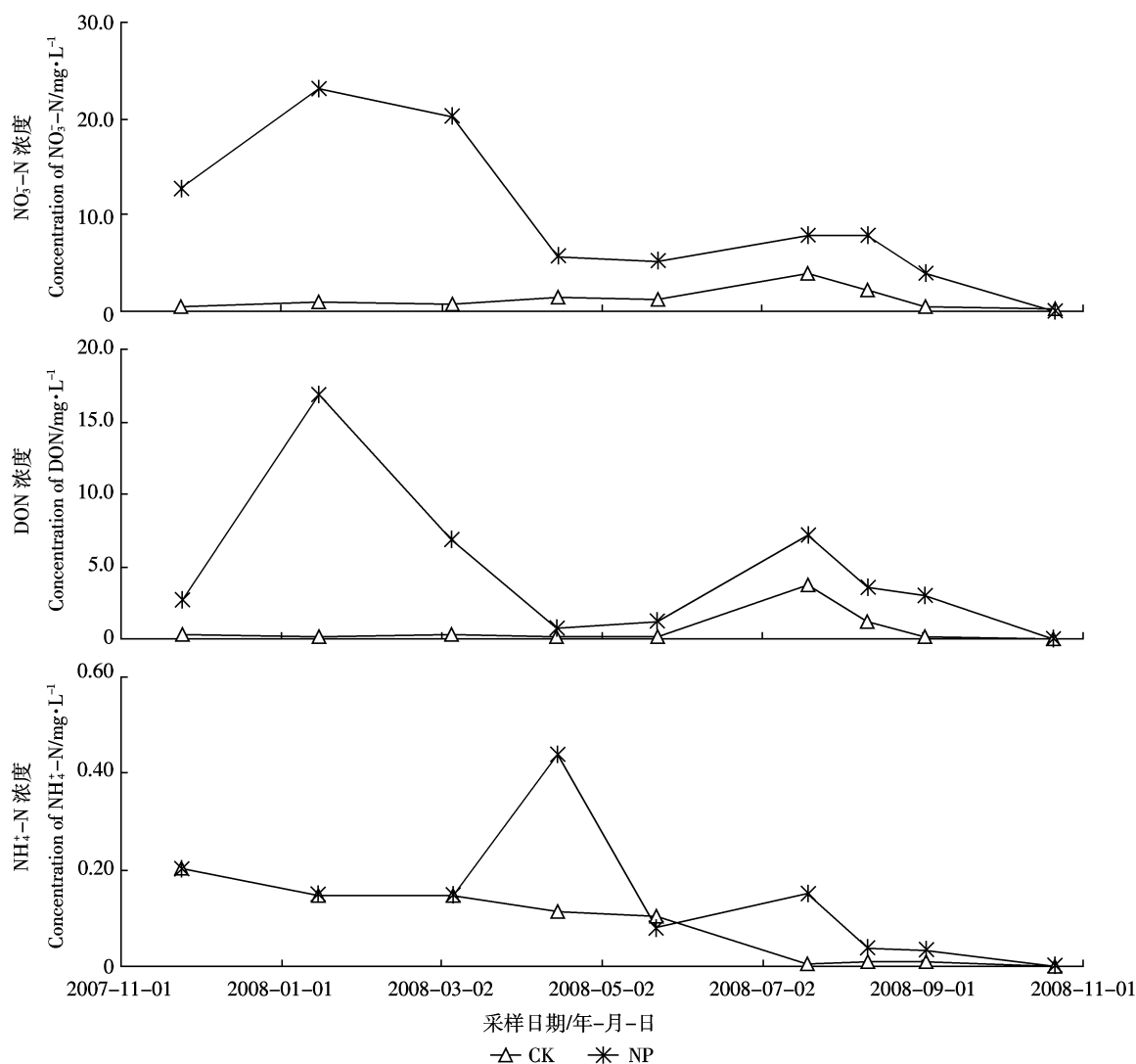


图4 小麦-玉米生长期间 80 cm 深渗漏池渗滤液中各形态氮浓度的动态变化

Figure 4 Dynamics of NO₃-N, NH₄⁺-N and DON in leachates of the 80 cm deep lysimeter during one wheat-maize rotation

理NO₃-N、DON 和 NH₄⁺-N 的累积淋溶量分别降低了 64.4%、42.9%和 54.8%。

表观淋溶率指氮素的淋溶量占氮肥用量的百分数,净淋溶率指施氮处理氮素淋溶量与不施氮处理氮素淋溶量之差占氮肥用量的百分数。从表 2 可以看出,随着渗漏池深度的增加,小麦-玉米期间施肥处理氮素的表观淋溶率和净淋溶率明显降低。

3 讨论

3.1 DON 在农田土壤氮素淋溶中的作用及效应

关于 DON 在生态系统氮素淋溶中的作用,国外在林地生态系统开展了不少研究。Perakis 等^[15-16]对南美未受人类干扰的森林流域 13 个地区 100 条河流的研究发现,平均有 80%的可溶性氮是以有机态的形式

损失。Van 等^[17-18]也指出,DON 通常是每年落叶林和针叶林的表层土壤淋溶的主要氮素形态。而国内外对农田土壤淋失氮中 DON 效应的研究尚少见报道。本研究发现,在我国北方小麦-玉米轮作体系下 DON 淋溶量平均约占氮素淋溶量的 1/4,说明除 NO₃-N 外 DON 是不可忽视的氮素淋失组分。王红霞等^[26]采用农田土壤进行室内土柱模拟淋溶试验发现,化肥处理氮淋失的形态也是 NO₃-N>DON>NH₄⁺-N。与国外对林地生态系统氮素损失形态的研究相比,本研究中农田土壤 DON 淋溶量占氮素淋溶总量的比例偏低,这与林地土壤含有较高的有机物有关。

一般认为,作物根系主要分布在 100 cm 深度的土层内^[27],氮素被土壤水淋滤至根区层之下称之为淋失。本研究中,100 cm 深渗漏池的 NP 和 NPM 处理

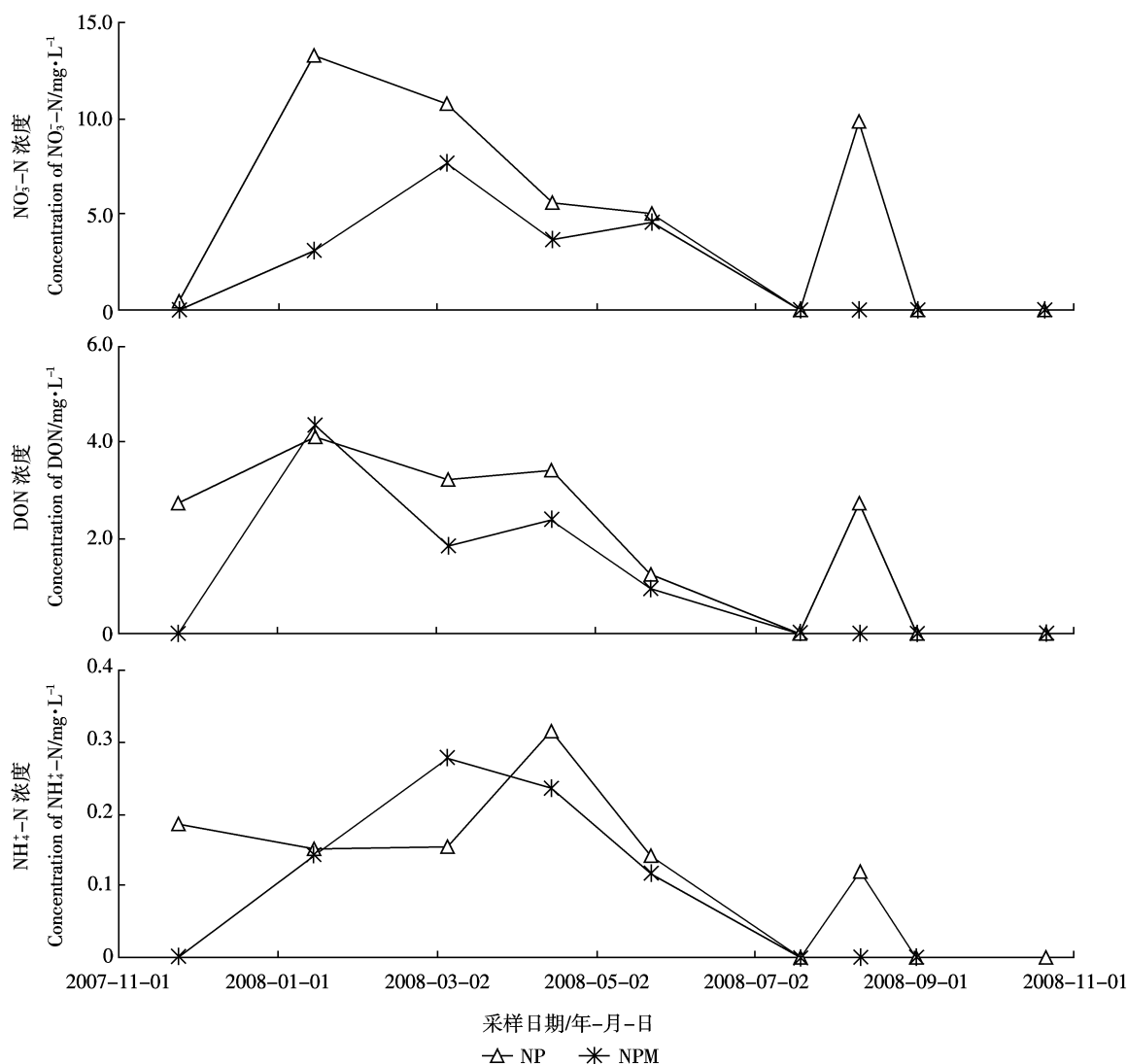


图5 小麦-玉米生长期间 100 cm 深渗漏池渗滤液中各形态氮浓度的动态变化

Figure 5 Dynamics of NO₃-N, NH₄-N and DON in leachates of the 100 cm deep lysimeter during one wheat-maize rotation

渗滤液中 DON 的浓度最高可达 4.36 mg·L⁻¹。DON 淋溶进入土壤下层,通过氧化和微生物作用可转化为 NO₃-N,同时 DON 淋溶过程中还会携带营养和污染物到地表和地下水中。因此,农田土壤中 DON 的淋溶对地下水的潜在影响值得关注。

3.2 影响土壤中氮素淋溶的因素

NP 处理与 CK 处理相比,明显增加了土壤 50 cm 和 80 cm 深度处 NO₃-N、DON 和 NH₄-N 的累积淋溶量;而 NPM 处理与 NP 处理相比,明显降低了土壤 100 cm 深度处 NO₃-N、DON 和 NH₄-N 的累积淋溶量。说明单施化学肥料有增加氮素淋溶的可能,而化学肥料和有机肥配施,明显降低了土壤中氮素的淋溶,这与宁建凤等^[28]采用网室盆栽试验的研究结果一致,可能与增施有机肥后提高了土壤的持水保肥能力

有关。应注意的是,过量使用有机肥同样存在增加土壤氮素淋失的风险^[29],合理施肥是减少氮素淋溶损失的关键。

易时来等^[24]采用养分渗漏池法研究了油菜生长季氮素在紫色土中的淋溶情况。结果表明,施氮量为 150 kg·hm⁻² 时,氮素的表观淋溶率范围在 2.77%~3.70%之间,净淋溶率在 0.98%~2.26%之间。相比之下,本试验中 50 cm 渗漏池和 80 cm 渗漏池的氮素平均表观淋失率和平均净淋失率偏高,这可能与供试土壤类型、肥力特性和作物种类的不同有关。

3.3 渗滤液中不同形态氮含量的动态变化原因

各处理在小麦-玉米生长期间渗滤液中 NH₄-N 的浓度偏低,这与旱地土壤硝化作用强烈,被矿化产生的 NH₄-N 很快被转化为 NO₃-N,以及 NH₄-N 易

表 2 小麦-玉米生长期各深度渗漏池不同处理各形态氮的累积淋溶量和淋溶率

Table 2 Accumulative leaching amount and ratio of NO_3^- -N, NH_4^+ -N and DON at different lysimeter depths during one wheat-maize rotation

渗漏池深度 Depth of lysimeter/cm	处理 Treatment	氮淋溶总量 Total leaching losses/ $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$	NO_3^- -N		NH_4^+ -N		DON		表观淋溶率 Apparent N leaching ratio/%	净淋溶率 Net N leaching ratio/%
			淋溶量 Leaching losses/ $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$	占总氮淋溶 量比例 Total leaching losses/%	淋溶量 Leaching losses/ $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$	占总氮淋溶 量比例 Total leaching losses/%	淋溶量 Leaching losses/ $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$	占总氮淋溶 量比例 Total leaching losses/%		
50	CK	7.32	5.31±2.32	72.6	0.12±0.01	1.6	1.89±0.13	25.9	—	—
	NP	27.41	22.12±3.80	80.7	0.12±0.04	0.5	5.17±1.70	18.7	7.6	5.6
80	CK	2.80	1.99±0.63	70.9	0.08±0.01	3.0	0.73±0.23	26.1	—	—
	NP	13.11	8.71±2.77	66.4	0.13±0.02	1.0	4.27±3.28	32.6	3.6	2.7
100	NP	4.81	3.59±0.22	74.5	0.07±0.01	1.5	1.15±0.02	24.0	1.3	—
	NPM	1.73	1.17±0.21	67.7	0.04±0.00	2.4	0.52±0.39	29.9	0.5	-0.9

被土壤胶体吸附有关。从不同深度渗漏池渗滤液中 NO_3^- -N 和 DON 浓度的动态变化看,CK 处理在 50 cm 和 80 cm 深度渗漏池渗滤液中这两种形态氮素的浓度峰均出现在 7 月,这与该时期水热条件适中,土壤有机氮的矿化作用加强,而且玉米生长处于苗期,作物对氮素的吸收弱,加之降水量较大等因素有关。NP 处理在 50 cm 和 80 cm 深度渗漏池渗滤液中 NO_3^- -N 和 DON 的浓度峰分别出现在 1 月和 7 月,这主要与小麦种植时间和 7 月施用基肥尿素以及作物对养分的吸收较弱有关。因此,适当控制基施氮肥用量,可以降低此时期 NO_3^- -N 和 DON 的淋溶。在 100 cm 深度 NP 处理渗漏池渗滤液中 NO_3^- -N 和 DON 的浓度峰与上述 50 cm 和 80 cm 深度池的略有不同,可能主要与由渗漏池深度增加引起的滞后作用有关。

NPM 处理在 100 cm 深度渗漏池渗滤液中 NO_3^- -N 的浓度高峰均出现在 3 月,这主要由于小麦种植时增施有机肥,为土壤微生物提供了充足的碳源,加之该时期土壤温度回升,土壤有机氮的矿化作用增强,而作物吸收能力相对较弱,导致土壤中 NO_3^- -N 累积,发生淋溶。DON 的浓度高峰出现在 1 月,这主要与小麦种植时施用氮肥和有机肥有关。可见不同施肥处理也影响氮素淋失的形态。

4 结论

在本试验条件下,小麦-玉米轮作年周期内农田土壤发生淋溶的氮素以 NO_3^- -N 为主,DON 次之, NH_4^+ -N 最低,其占淋溶总氮的比例平均分别为 72.1%、26.2%和 1.7%;单施化学肥料会增加氮素的淋溶,而化学肥料和有机肥配施由于提高了土壤的持水保肥能力,明显降低了土壤中氮素的淋溶;在小麦-玉米轮作的年周期内 NPM 处理 NO_3^- -N、DON 和 NH_4^+ -N 的

累积淋溶量比 NP 处理分别降低 64.4%、42.9%和 54.8%。

参考文献

- [1] 朱兆良,文启孝.中国土壤氮素[M].南京:江苏科技出版社,1992:32-58.
ZHU Zhao-liang, WEN Qi-xiao. Nitrogen in soils of China[M]. Nan-jing: Jiangsu Science and Technology Press, 1992:32-58.
- [2] 巨晓棠,张福锁.关于氮肥利用率的思考[J].生态环境,2003,12(2):192-197.
JU Xiao-tang, ZHANG Fu-suo. Thinking about nitrogen recovery rate [J]. *Ecology and Environment*, 2003, 12(2):192-197.
- [3] Ceccon P, Dallacosta L, Dellevedove G, et al. N in drainage water as influenced by soil depth and N fertilizer: A study in lysimeters[J]. *European Journal of Agronomy*, 1995, 4(3):289-298.
- [4] Goss M J, Ehlers W. The role of lysimeters in the development of our understanding of soil water and nutrient dynamics in ecosystems[J]. *Soil Use and Management*, 2009, 25:213-223.
- [5] Celia M A, Bouloutas E T, Zarba R L. A general mass-conservative numerical solution for the unsaturated flow equation[J]. *Water Resources Research*, 1990, 26(7):1483-1496.
- [6] Amoozengar F A, Nielsen D R, Warrick A W. Soil solute concentration distributions for spatial varying pore water velocities and apparent diffusion coefficients[J]. *Soil Sci Soc Am J*, 1982, 46:3-9.
- [7] 连纲,王德建,林静慧.太湖地区稻田土壤养分淋洗特征[J].应用生态学报,2003,14(11):1879-1883.
LIAN Gang, WANG De-jian, LIN Jing-hui. Characteristics of nutrient leaching from paddy field in Taihu Lake area[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2003, 14(11):1879-1883.
- [8] 余贵芬,吴泓涛,魏永胜,等.稻田土壤中 N 的渗漏损失研究[J].植物营养与肥料学报,1999,5(4):316-320.
YU Gui-fen, WU Hong-tao, WEI Yong-sheng, et al. Study on nitrogen migration in purple soil and nitrogen uptake by rice[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 1999, 5(4):316-320.
- [9] 任丽萍,宋玉芳,许华夏,等.旱田养分淋溶规律及对地下水影响的研究[J].农业环境科学学报,2001,20(3):133-136.

- REN Li-ping, SONG Yu-fang, XU Hua-xia, et al. Evaluation of nutrients in glebe-soil and its influence on groundwater[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2001, 20(3):133-136.
- [10] 王家玉, 王胜佳, 陈义, 等. 稻田土壤中N的渗漏损失研究[J]. 应用生态学报, 1995, 6(suppl):62-66.
- WANG Jia-yu, WANG Sheng-jia, CHEN Yi, et al. Leaching loss of nitrogen in rice field[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 1995, 6(suppl):62-66.
- [11] 习金根, 周建斌. 不同灌溉施肥方式下尿素态氮在土壤中迁移转化特性的研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2003, 9(3):271-275.
- XI Jin-gen, ZHOU Jian-bin. Leaching and transforming characteristics of urea-N added by different ways of fertigation[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2003, 9(3):271-275.
- [12] 张玉铭, 张佳宝, 胡春胜, 等. 华北太行山前平原农田土壤水分动态与氮素的淋溶损失[J]. 土壤学报, 2006, 43(1):17-25.
- ZHANG Yu-ming, ZHANG Jia-bao, HU Chun-sheng, et al. Nitrate leaching in wheat-maize Rotation Field in the North China Plain[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2006, 43(1):17-25.
- [13] 邹诚, 徐福利, 闫亚丹. 黄土高原丘陵沟壑区不同土地利用模式对土壤氮素淋溶的影响[J]. 水土保持研究, 2009, 16(3):114-116.
- ZOU Cheng, XU Fu-li, YAN Ya-dan. Analysis of soil nitrogen leaching under different land uses patterns in the Loess Hilly and Gully Region[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2009, 16(3):114-116.
- [14] Hagedorn F, Bucher J B, Schlegel P. Contrasting dynamics of dissolved inorganic and organic nitrogen in soil and surface waters of forested catchments with Gleysols[J]. *Geoderma*, 2001, 100(1&2):173-192.
- [15] 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.
- [16] Perakis S S, Hedin L Q. Fluxes and fates of nitrogen in soil of an unpolluted old growth temperate forest[J]. *Ecology*, 2001, 82(8):2245-2260.
- [17] Van Cleve K, White R. Forest-floor nitrogen dynamics in a 60-year-old paper birch ecosystem in interior Alaska[J]. *Plant Soil*, 1980, 54(3):359-381.
- [18] Qualls R G, Haines B L. Geochemistry of dissolved organic nutrients in water percolating through a forest ecosystem[J]. *Soil Sci Soc Am J*, 1991, 55(4):1112-1123.
- [19] 杨学云, 李生秀, Brookes P C. 灌溉与旱作条件下长期施肥土剖面磷的分布和移动[J]. 植物营养与肥料学报, 2004, 10(3):250-254.
- YANG Xue-yun, LI Sheng-xiu, Brookes P C. Phosphorus distribution and leaching in loessial soil profile with long-term fertilization under irrigation and rainfed condition[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2004, 10(3):250-254.
- [20] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京:中国农业出版社, 2000.
- BAO Shi-dan. Agricultural chemistry analysis of soil[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2000.
- [21] 周建斌, 李生秀. 碱性过硫酸钾氧化法测定溶液中全氮含量氧化剂的选择[J]. 植物营养与肥料学报, 1998, 4(3):299-304.
- ZHOU Jian-bin, LI Sheng-xiu. Choosing of a proper oxidizer for alkaline persulfate oxidation to determining total nitrogen in solution[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 1998, 4(3):299-304.
- [22] 杨绒, 赵满兴, 周建斌. 过硫酸钾氧化法测定溶液中全氮含量的影响条件研究[J]. 西北农林科技大学学报, 2005, 33(12):107-111.
- YANG Rong, ZHAO Man-xing, ZHOU Jian-bin. Effects of different conditions on the determination of total nitrogen in solution by persulfate oxidation method[J]. *Journal of Northwest Sci-Tech University of Agriculture and Forestry*, 2005, 33(12):107-111.
- [23] 刘宏斌, 李志宏, 张维理, 等. 露地栽培条件下大白菜氮肥利用效率与硝态氮淋溶损失研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2004, 10(3):286-291.
- LIU Hong-bin, LI Zhi-hong, ZHANG Wei-li, et al. Study on N use efficiency of Chinese cabbage and nitrate leaching under open field cultivation[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2004, 10(3):286-291.
- [24] 易时来, 石孝均. 油菜生长季氮素在紫色土中的淋失[J]. 水土保持学报, 2006, 20(1):83-86.
- YI Shi-lai, SHI Xiao-jun. Nitrogen leaching loss in growth period of rape in purple soil[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2006, 20(1):83-86.
- [25] 张富仓, 康绍忠. 土壤水分入渗的温度效应及其数学模式[J]. 中国农业大学学报, 1997, 2(增刊):20-25.
- ZHANG Fu-cang, KANG Shao-zhong. The temperature effect of water infiltration and mathematical model[J]. *Journal of China Agricultural University*, 1997, 2(suppl):20-25.
- [26] 王红霞, 周建斌, 雷张玲, 等. 有机肥中不同形态氮及可溶性有机碳在土壤中淋溶特性研究[J]. 农业环境科学学报, 2008, 27(4):1364-1370.
- WANG Hong-xia, ZHOU Jian-bin, LEI Zhang-ling, et al. Leaching of different forms of nitrogen and dissolved organic carbon of organic manure in soil column[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2008, 27(4):1364-1370.
- [27] 左海军, 张奇, 徐力刚. 农田氮素淋溶损失影响因素及防治对策研究[J]. 环境污染与防治, 2008, 30(12):83-89.
- ZUO Hai-jun, ZHANG Qi, XU Li-gang. The study of the effect factors and protection countermeasures of nitrogen leaching in arable soil[J]. *Environmental Pollution & Control*, 2008, 30(12):83-89.
- [28] 宁建凤, 邹献中, 杨少海, 等. 有机无机氮肥配施对土壤氮淋失及油菜生长的影响[J]. 农业工程学报, 2007, 23(11):95-100.
- NING Jian-feng, ZOU Xian-zhong, YANG Shao-hai, et al. Effects of combined application of organic and inorganic nitrogen fertilizer on the soil nitrogen leaching and the growth of leaf-let lettuce[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2007, 23(11):95-100.
- [29] Paolo M, Letizia F, Giovanni P B, et al. Nitrate leaching through the unsaturated zone following pig slurry applications[J]. *Journal of Hydrology*, 2006, 316:195-212.