

# 施氮和秸秆还田对小麦-玉米轮作农田硝态氮淋溶的影响\*

杨宪龙<sup>1,2</sup> 路永莉<sup>1,2</sup> 同延安<sup>1,2†</sup> 林文<sup>1,2</sup> 梁婷<sup>1,2</sup>

(1 西北农林科技大学资源环境学院, 陕西杨凌 712100)

(2 农业部西北植物营养与农业环境重点实验室, 陕西杨凌 712100)

**摘要** 连续 4 a 采用渗漏计测定法研究了陕西关中小麦-玉米轮作区施氮和秸秆还田对土壤剖面 90 cm 处  $\text{NO}_3^-$ -N 淋溶的影响。结果表明,  $\text{NO}_3^-$ -N 淋洗主要发生在 7、8、9 月份或灌溉后, 年际间变异较大。监测期内各处理渗漏液  $\text{NO}_3^-$ -N 浓度和淋失量的变幅为 0 ~ 103.5  $\text{mg L}^{-1}$  和 0 ~ 21.8  $\text{kg hm}^{-2}$ , 二者均随施氮量的增加呈增加趋势。小麦施氮 150  $\text{kg hm}^{-2}$ 、玉米施氮 180  $\text{kg hm}^{-2}$  时, 连续 4 a 作物均能获得高产。施氮量继续增加, 产量不再增加, 0 ~ 100 cm 土层  $\text{NO}_3^-$ -N 累积量和 90 cm 处  $\text{NO}_3^-$ -N 淋失量却相应增加。秸秆还田 2 a 后作物显著增产, 2010 年和 2011 年分别增产 15.1% 和 14.2%, 但对  $\text{NO}_3^-$ -N 累积和淋溶的影响不显著。回归分析显示,  $\text{NO}_3^-$ -N 年淋失量和 0 ~ 100 cm 土层累积量均随年施氮量的增加呈指数形式增加, 说明施氮量越高,  $\text{NO}_3^-$ -N 年淋失量和累积量越高, 二者占施氮量的比例也越高。

**关键词** 施氮水平; 秸秆还田; 小麦-玉米轮作; 硝态氮; 淋溶

**中图分类号** S153.6 **文献标识码** A

硝态氮淋洗一直是农业和环境科学工作者普遍关注的热点问题。早在 1905 年, Warrington 就开始关注硝态氮淋溶, 认为它是农田氮素损失的重要途径<sup>[1]</sup>。我国研究起步较晚, 始于 20 世纪 80 年代, 特别是近年来, 随着对水环境污染问题的逐步重视, 人们陆续开展了有关  $\text{NO}_3^-$ -N 淋失理论<sup>[2-4]</sup>、模型<sup>[4-5]</sup>及影响因素<sup>[6-11]</sup>等方面的大量研究工作。 $\text{NO}_3^-$ -N 是土壤氮素转化、迁移过程中最活跃的氮素形态, 它带负电荷, 难以被土壤颗粒吸附, 当降雨或灌溉超过田间饱和持水量时,  $\text{NO}_3^-$ -N 即随水向下淋失<sup>[12]</sup>。据报道, 施入农田的氮肥约有 30% ~ 50% 通过淋溶进入地下水, 导致地下水  $\text{NO}_3^-$ -N 含量增加<sup>[1]</sup>。一般认为, 发生  $\text{NO}_3^-$ -N 淋洗必须同时具备两个条件, 一是土壤剖面中有大量  $\text{NO}_3^-$ -N 累积, 二是土壤含水量高于田间饱和持水量, 造成土壤水的垂直移动。 $\text{NO}_3^-$ -N 残留越多, 其向下淋失风险越大, 而残留量与施氮量密切相关。吕殿青等<sup>[13]</sup>采用渗漏池研究发现,  $\text{NO}_3^-$ -N 淋失量与施氮量呈线性关系, 且分次施氮的淋失量明显高于一次性施氮。而袁新民等<sup>[14]</sup>认为, 由于作物对氮的吸收并不是按比

例增加的, 土壤中  $\text{NO}_3^-$ -N 含量随施肥量的增加而增加, 但并非线性相关, 超过正常施氮量后, 土壤残留  $\text{NO}_3^-$ -N 累积量显著增加。近年来, 关于  $\text{NO}_3^-$ -N 淋洗国内开展了大量研究, 但是对降雨量在 400 ~ 700 mm 左右的中国北方地区仍重视不够, 在陕西关中结合当地特定气候和典型种植制度开展的长期田间原位研究较少, 尚未探明本地区硝态氮淋失的本底值和氮肥施用对淋失的影响。再者, 关于秸秆还田对硝态氮淋溶的影响报道较少。鉴于此, 本试验连续 4 a 采用渗漏计测定法研究了陕西关中小麦-玉米轮作区施氮和秸秆还田对硝态氮淋洗的影响, 以为当地农民合理施肥 and 环境保护决策提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验地概况

试验于 2008 年 - 2011 年在陕西杨凌“国家黄土肥力肥效监测基地”(34°4'N、108°2'E)进行。该试验站地处黄土高原南部, 海拔 534 m, 年均气温 13℃,  $\geq 10^\circ\text{C}$  积温 4 196.2℃, 年均降水 550 ~ 600 mm,

\* 公益性行业(农业)科研专项(20100314)经费资助

† 通讯作者, E-mail: tongyanan@nwsuaf.edu.cn

作者简介: 杨宪龙(1988—), 男, 甘肃兰州人, 硕士研究生, 主要从事农田氮素淋溶研究。E-mail: yangxianlong1988@126.com Tel: 15109217613

收稿日期: 2012-06-08; 收到修改稿日期: 2012-11-13

蒸发量 993 mm,属暖温带半湿润偏旱气候。地下水位 28 m,深井抽水灌溉,实行冬小麦-夏玉米轮作一年两熟制。供试土壤为壤土,播前耕层土壤理化性

状为:全氮  $0.85 \text{ g kg}^{-1}$ ,有机质  $17.06 \text{ g kg}^{-1}$ ,有效磷  $15.03 \text{ mg kg}^{-1}$ ,速效钾  $365.8 \text{ mg kg}^{-1}$ ,pH 7.38。2007 年-2011 年作物生育期内降水量分布见图 1。

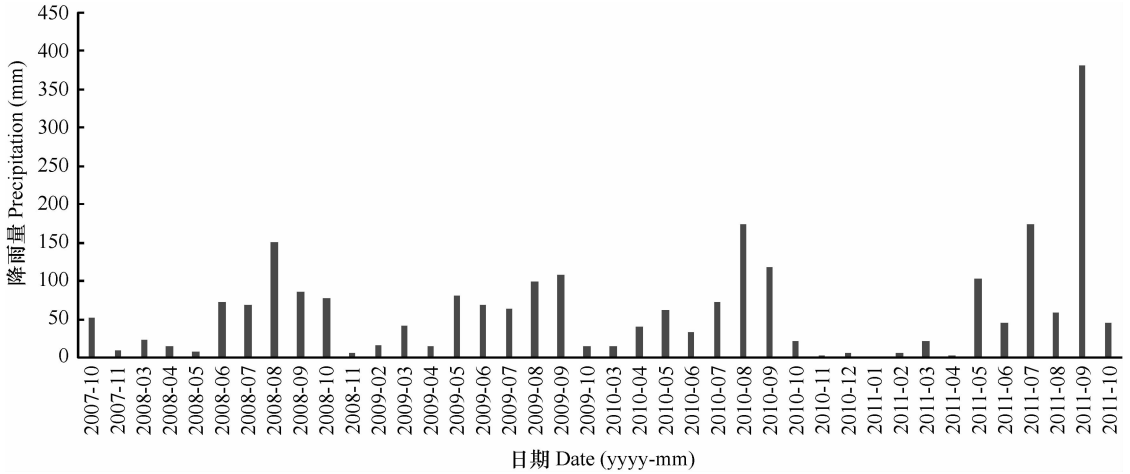


图 1 小麦-玉米生育期降水量动态变化(2007 年 10 月-2011 年 10 月)

Fig. 1 Dynamics of precipitation during the wheat and maize growing seasons in October 2007-October 2011

## 1.2 试验设计

试验设不施肥(N0)、减量施氮(N165)、优化施氮(N330)、增量施氮(N495)和优化施氮+秸秆还田(N330+S)共 5 个处理,重复 3 次,小区面积为  $5 \text{ m} \times 6 \text{ m}$ ,田间随机排列。小麦、玉米供试品种分别为小偃 22 和郑单 958。各处理小麦季施氮量(以纯氮计)依次为:0、75、150、225 和  $150 \text{ kg hm}^{-2}$ ,玉米季依次为 0、90、180、270 和  $180 \text{ kg hm}^{-2}$ 。小麦播前撒施磷肥( $100 \text{ kg hm}^{-2}$ ,以  $\text{P}_2\text{O}_5$ 计)和 50% 氮肥作为基肥,然后翻耕入土,另 50% 氮肥于返青后拔节前追施。玉米季磷、钾肥和 50% 氮肥于五叶期施入,施磷量为  $60 \text{ kg hm}^{-2}$ ,施钾量为  $75 \text{ kg hm}^{-2}$ (以

$\text{K}_2\text{O}$  计),另 50% 氮肥于喇叭口期追施。小麦播前玉米秸秆粉碎还田,玉米五叶期小麦秸秆粉碎还田,还田量均为  $5000 \text{ kg hm}^{-2}$ 。灌溉等其他田间管理措施与当地农民一致。

硝态氮淋洗研究采用渗漏计测定法(Lysimeter 法),它可以直接提取渗滤液测定淋溶体积和  $\text{NO}_3^- \text{-N}$  浓度,被认为是研究  $\text{NO}_3^- \text{-N}$  淋溶最直接最有效的方法。2007 年试验开始前在每个小区内部东西两侧 90 cm 土层深度处分别安装规格为  $40 \text{ cm} \times 50 \text{ cm}$  的 PVC 管材淋溶盘一个,淋溶盘和集液管通过软管相连接,淋溶液通过软管自动汇集于集液管,取样时用真空泵抽取淋溶液测定体积和硝态氮浓度即可(图 2)。

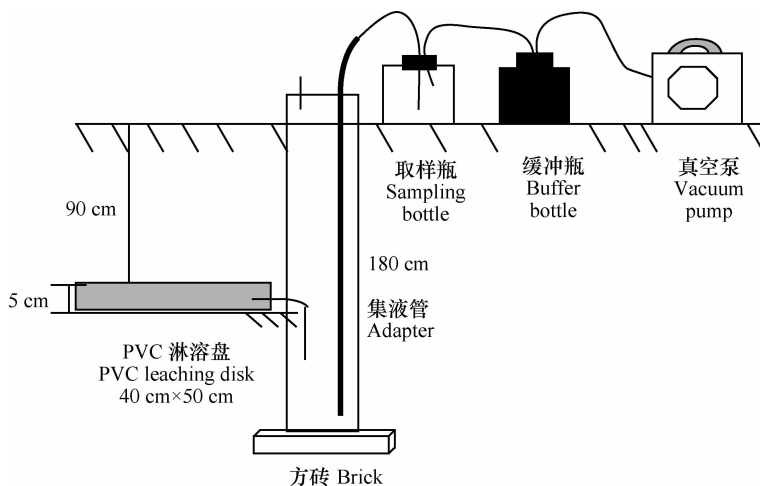


图 2 田间原位淋溶装置示意图

Fig. 2 Sketch map of the in-situ lysimeter in the field

### 1.3 样品采集与分析

**1.3.1 淋溶水样** 淋溶水样在每次降雨或灌溉后第3至第4天采集,用真空泵吸取淋溶液,量取体积后取100 ml样品,带回实验室低温保存。测试当天解冻、过滤至滤液清亮,然后采用 cleverchem200 间断化学分析仪测定  $\text{NO}_3^-$ -N 含量。

**1.3.2 土壤样品** 玉米收获时分 0~20、20~40、40~60、60~80 和 80~100 cm 五个层次采集土样,每小区5个点,按层次混合后放入冰盒,带回实验室冷冻保藏(-20℃),一周内测定含水量和  $\text{NO}_3^-$ -N 含量。含水量测定采用烘干法,  $\text{NO}_3^-$ -N 测试当天将土样混匀后过 2 mm 筛,用 0.01 mol L<sup>-1</sup> CaCl<sub>2</sub> 浸提, Cleverchem200 间断化学分析仪测定。

**1.3.3 植株样品** 冬小麦收获时采收一定面积作为样品带回,风干、脱粒,分籽粒和秸秆依次称重,然后以采样面积折算生物量。夏玉米各小区全部收获,分别称量各小区秸秆和肉穗鲜重,然后取20棒肉穗和部分秸秆带回,风干、脱粒、称量干重,以小区总鲜重折算生物量。

### 1.4 数据处理

数据分析及作图采用 Excel、SAS 和 Origin8.0 进行,分析过程所用公式如下:

$$\text{NO}_3^- \text{-N 累积量 (kg hm}^{-2}\text{)} = \text{土层厚度 (cm)} \times \text{土壤容重 (g cm}^{-3}\text{)} \times \text{NO}_3^- \text{-N 含量 (mg kg}^{-1}\text{)} / 10$$

$$\text{NO}_3^- \text{-N 年淋失量 (kg hm}^{-2} \text{ a}^{-1}\text{)} = \sum_{i=1}^n \frac{C_i \times V_i \times 10000}{0.4 \times 0.5}$$

式中:  $C_i$  为第  $i$  次淋溶液中  $\text{NO}_3^-$ -N 的浓度;  $V_i$  为第  $i$  次淋溶时从集液管中抽取的原始体积;  $n$  为  $\text{NO}_3^-$ -N 发生淋失的次数。

$$\text{NO}_3^- \text{-N 年淋失率 (\%)} = (\text{施氮处理 NO}_3^- \text{-N 年淋失量 (kg hm}^{-2} \text{ a}^{-1}\text{)} - \text{不施氮处理 NO}_3^- \text{-N 年淋失量 (kg hm}^{-2} \text{ a}^{-1}\text{)}) \times 100 / \text{年施氮量 (kg hm}^{-2} \text{ a}^{-1}\text{)}$$

## 2 结果

### 2.1 不同处理对小麦-玉米轮作体系产量的影响

2008年-2011年小麦-玉米轮作体系作物产量如表1所示。结果表明,施氮能显著增加作物产量,各处理4年平均产量变幅为12.9~14.4 t hm<sup>-2</sup>,较空白增产39.2%~55.7%。不同年份体系作物产量随施氮量的增加,表现为先增加后不变甚至降低的趋势,小麦季施氮150 kg hm<sup>-2</sup>、玉米季施氮180 kg hm<sup>-2</sup>时,作物连续4a均能获得相对高产,过高过低均有减产风险。随着种植年限的推移,秸秆还田(N330+S)增产效果逐渐凸显,2008年产量较N330略有降低趋势,2009年开始逐渐提高,2010年和2011年增产分别达14.9%和14.2%。

表1 不同处理对小麦-玉米体系产量的影响(2008年-2011年)

Table 1 Effect of treatment on output of the wheat and maize rotation system during the years of 2008-2011

处理 Treatment	年施氮量 Annual N input (kg hm <sup>-2</sup> )	不同年份小麦-玉米体系产量 Grain yield of the rotation system each year (10 <sup>3</sup> kg hm <sup>-2</sup> )				平均 Average	增产 Increment (%)
		2008	2009	2010	2011		
		N0	0	9.03 ± 0.77b	8.77 ± 0.48c		
N165	165	11.6 ± 1.3a	11.8 ± 0.1b	14.6 ± 1.2c	14.6 ± 1.2c	12.9	39.2
N330	330	13.2 ± 0.9a	13.5 ± 0.7a	15.9 ± 0.5bc	14.8 ± 1.1bc	14.4	55.7
N495	495	12.1 ± 1.8a	13.1 ± 1.8ab	16.0 ± 1.2bc	14.6 ± 1.6bc	14.0	51.6
N330+S	330	12.9 ± 1.2a	13.7 ± 0.4a	18.3 ± 0.6a	16.9 ± 0.9a	15.5	67.4

注:同一列数据后不同字母代表差异达5%显著水平,下同 Note: Values followed by different letters in the same column are significant in difference at 5% level, and the same below

### 2.2 不同处理对0~100 cm 土层 $\text{NO}_3^-$ -N 累积与分布的影响

不同年份玉米收获期0~100 cm 土层  $\text{NO}_3^-$ -N 的累积与分布如表2所示。结果显示,随着土层深度的增加,  $\text{NO}_3^-$ -N 累积量均表现为逐渐降低或先增加后降低的趋势,但80~100 cm 土层仍有较多累积,平均占1 m 土层累积总量的11.8%~

15.3% (4年变幅)。施氮量越高,该土层残留量越大,可见过量施氮后  $\text{NO}_3^-$ -N 可被淋洗至1 m 土层以下。随氮肥用量的增加,同一土层内  $\text{NO}_3^-$ -N 累积量逐渐增加,1 m 土层内的累积总量也逐渐增加。然而,不同年份间1 m 土层内  $\text{NO}_3^-$ -N 累积量变异较大,2008年各处理平均为75.4 kg hm<sup>-2</sup>,2009年较2008年增加了1.2倍,达167.0 kg hm<sup>-2</sup>,2010

年、2011 年依次为  $120.9 \text{ kg hm}^{-2}$  和  $69.3 \text{ kg hm}^{-2}$ , 较 2009 年降低了 27.6% 和 58.5%。这可能与不同年份作物生育期内降雨量、降雨时间和作

物生长状况存在差异有关。秸秆还田对  $\text{NO}_3^-$ -N 的累积与分布在不同年份均没有表现出显著影响。

表 2 玉米收获期 0~100cm 土层硝态氮分布(2008 年-2011 年)

Table 2 Nitrate distribution in the 0~100 cm soil layer at the harvest stage of maize during the years of 2008-2011

采样时间 Sampling time	处理 Treatment	不同土层硝态氮累积量					1 m 土层累积量
		Nitrate distribution in the 0~100 cm soil layer( $\text{kg hm}^{-2}$ )					Nitrate accumulated in the 0~100 cm soil layer( $\text{kg hm}^{-2}$ )
		0~20 cm	20~40 cm	40~60 cm	60~80 cm	80~100 cm	
2008 年玉米收获后 After corn harvested in 2008	N0	6.5d	7.9d	6.8b	7.7bc	7.7b	36.6 c
	N165	10.7bed	7.9d	7.9b	6.4c	6.6b	39.5 bc
	N330	8.5cd	16.3cd	13.3b	17.0abc	14.3a	69.4 bc
	N495	22.0a	39.1a	30.5a	27.5 a	15.4a	134.5 a
	N330+S	12.7bc	30.2ab	15.9b	9.1bc	5.7b	73.6 b
2009 年玉米收获后 After corn harvested in 2009	N0	13.2 b	9.2 b	5.2 b	6.8 c	4.6 b	39.0 b
	N165	6.9 b	19.9 ab	11.2 ab	6.9 c	6.2 b	51.1 b
	N330	52.0 ab	24.3 ab	14.4 ab	6.4 c	9.3 ab	106.4 b
	N495	57.5 ab	65.7 a	83.4 ab	72.8 a	42.2 a	321.6 a
	N330+S	56.8 ab	36.1ab	36.0 ab	15.6 bc	18.3 ab	162.8 ab
2010 年玉米收获后 After corn harvested in 2010	N0	13.1 b	4.9 d	4.9 d	4.0 c	2.4 d	29.3 c
	N165	15.7 b	8.9 d	9.1 d	4.2 c	3.4 d	41.3 c
	N330	33.7 a	27.3 c	25.8 bc	25.7 b	19.9 b	132.4 b
	N495	44.5 a	39.5 ab	39.6 ab	36.9 a	34.2 a	194.7 a
	N330+S	38.4 a	28.6 bc	18.3 cd	11.5 c	12.2 c	109.0 b
2011 年玉米收获后 After corn harvested in 2011	N0	9.6 b	5.2 b	1.4 d	0.5 c	0.3 c	17.0 c
	N165	16.3 b	6.9 b	4.9 cd	13.8 b	2.1 c	44.0 d
	N330	27.0 a	8.7 b	4.7 cd	13.9 b	9.1 b	63.4 b
	N495	31.4 a	19.7 a	19.3 a	23.4 a	24.0 a	117.8 a
	N330+S	30.4 a	9.3 b	7.2 c	10.1 b	7.4 b	64.4 b

### 2.3 监测期内各处理 $\text{NO}_3^-$ -N 淋溶动态变化

2008 年-2011 年土层 90 cm 处渗漏液量(以 mm 为单位)、渗漏液  $\text{NO}_3^-$ -N 浓度和  $\text{NO}_3^-$ -N 淋失量的动态变化如图 3 所示。整个监测期内共发生了 12 次淋溶。其中,2008 年 2 次,均由灌溉引起(图中箭头所示,下同),为了测试淋溶装置能否正常工作,第一次灌溉时适当增大了灌水量(190 mm),由于灌溉量较大且设备安装时无可避免地破坏了土层的原状结构,所以淋溶量也相对较高,第二次灌水 90 mm,以后每次灌溉同当地农民习惯一致;2009 年 3 次,前两次由灌溉引起,灌溉量依次为 75 和 90 mm。第三次为降雨淋溶,发生在降雨量最大的 9

月份;2010 年 5 次,除 7 月 9 日由灌溉(90 mm)引起外,其他 4 次为降雨淋溶,其中 3 次均发生在降雨量较大的 8、9 月份。2011 年 2 次,均由 9 月下旬的连续降雨所致。总体来讲,监测期内渗漏液  $\text{NO}_3^-$ -N 浓度和  $\text{NO}_3^-$ -N 淋失量的变化趋势具有较高的一致性,二者变幅依次为  $0 \sim 103.5 \text{ mg L}^{-1}$  和  $0 \sim 21.8 \text{ kg hm}^{-2}$ , 均随施氮量的增加呈增加趋势, $\text{NO}_3^-$ -N 浓度越高,淋失量也相对越大。渗漏液量由于受灌溉、降雨、蒸腾、作物生长状况等因素的影响,波动性较大,和  $\text{NO}_3^-$ -N 浓度和淋失量的变化趋势差异较大。秸秆还田在前 5 次淋溶中对  $\text{NO}_3^-$ -N 浓度和淋失量表现为增加趋势,后 7 次表现为降低趋势,总体影响不明显。

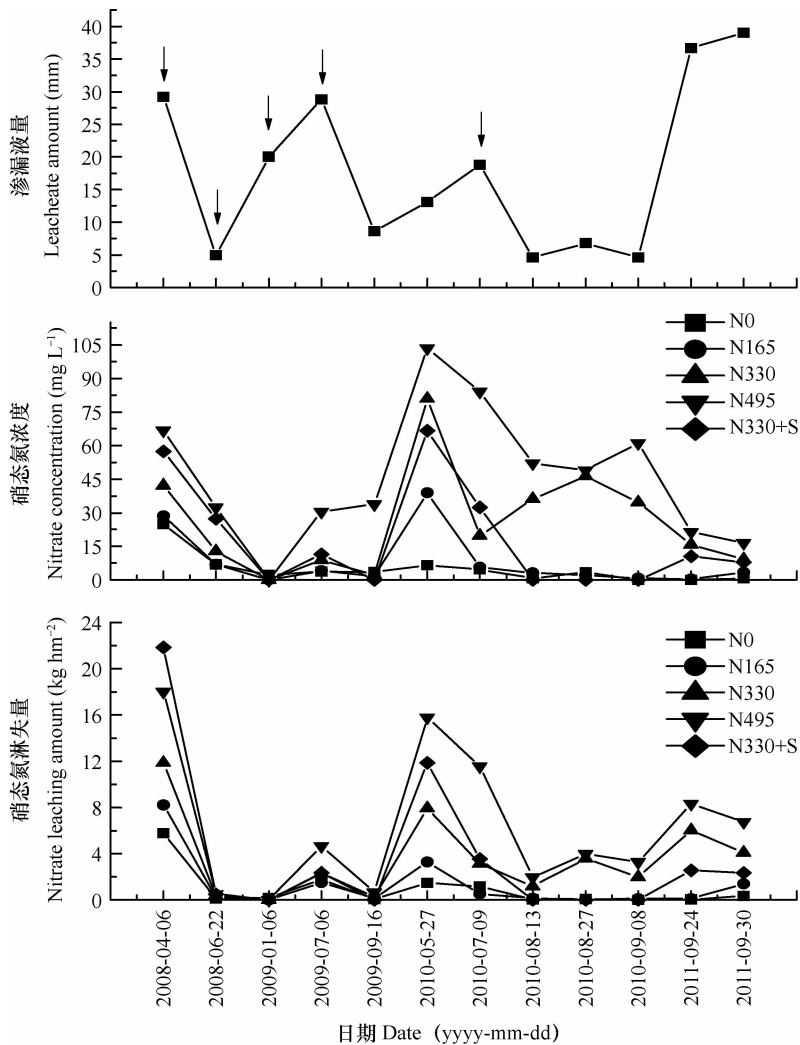


图3 2008-2011年渗漏液量、渗漏液硝态氮浓度和硝态氮淋溶量的动态变化

Fig. 3 Dynamics of leachate, nitrate concentration therein and leaching of nitrate during the years of 2008-2011

## 2.4 不同处理对 $\text{NO}_3^-$ -N 年淋失量和淋失率的影响

不同年份各处理对  $\text{NO}_3^-$ -N 年淋失量和淋失率的影响如图4所示。结果显示,  $\text{NO}_3^-$ -N 年淋失量和淋失率年际间变异较大。2008年、2009年、2010年和2011年各处理淋失量的变幅依次为 5.9 ~ 22.3  $\text{kg hm}^{-2}$ 、1.6 ~ 5.3  $\text{kg hm}^{-2}$ 、2.7 ~ 36.6  $\text{kg hm}^{-2}$  和 0.4 ~ 15.0  $\text{kg hm}^{-2}$ , 淋失率的变幅为 1.6% ~ 5.0%、-0.2% ~ 0.7%、0.8% ~ 6.8% 和 0.7% ~ 3.0%。4年平均淋失量为 2.7 ~ 18.9  $\text{kg hm}^{-2}$ , 淋失率为 0.7% ~ 3.3%, 相当于年流失尿素 5.9 ~ 41.0  $\text{kg hm}^{-2}$ 。不同年份  $\text{NO}_3^-$ -N 年淋失量和淋失率均随施氮量的增加表现为增加趋势。与 N165 相比, N330 和 N495 氮肥用量分别增加了 100% 和 200%, 但二者  $\text{NO}_3^-$ -N 年淋失量却增加了 173% 和 381%, 淋失率增加了

236% 和 354% (4 年平均)。可见, 施氮量越高,  $\text{NO}_3^-$ -N 年淋失量越高, 淋失量占施氮量的比例也越高。N330 + S 处理  $\text{NO}_3^-$ -N 年淋失量和淋失率平均为 11.2  $\text{kg hm}^{-2}$  和 2.5%, 与 N330 差异不显著。

## 2.5 硝态氮年淋失量、0 ~ 100 cm 土层残留量与施氮量的关系

为了探究  $\text{NO}_3^-$ -N 年淋失量、玉米收获期 1 m 土层内  $\text{NO}_3^-$ -N 累积量与年施氮量的确定性关系, 我们利用 4 a 监测数据分别将二者与年施氮量作了回归分析。由于监测周期较长, 经历了不同降雨年份和气象变异, 所以可以反映本地区  $\text{NO}_3^-$ -N 淋失和残留的实际水平, 具有一定指导意义。结果显示(图5),  $\text{NO}_3^-$ -N 年淋失量和 0 ~ 100 cm 土层累积量均随施氮量的增加呈指数形式增加。 $\text{NO}_3^-$ -N 年淋失量  $y$  与年施氮量  $x$  的回归关系为:  $y = 1.717e^{0.004x}$ ; 1 m 土

层  $\text{NO}_3^-$ -N 累积量  $z$  与年施氮量  $x$  的关系为  $z = 26.61e^{0.003x}$ , 回归方程通过线性转化, 采用 F 检验法进行显著性分析, 结果显示, 二者均达到了 1% 的极显著水平, 可见用上述两个方程来估计本地区

$\text{NO}_3^-$ -N 淋溶和 1 m 土层内的残留是较为可行的。二者随施氮量的指数增长模式说明施氮量越高,  $\text{NO}_3^-$ -N 年淋失量和 1 m 土层的累积量越高, 且淋失量和残留量占施氮量的比例也越高。

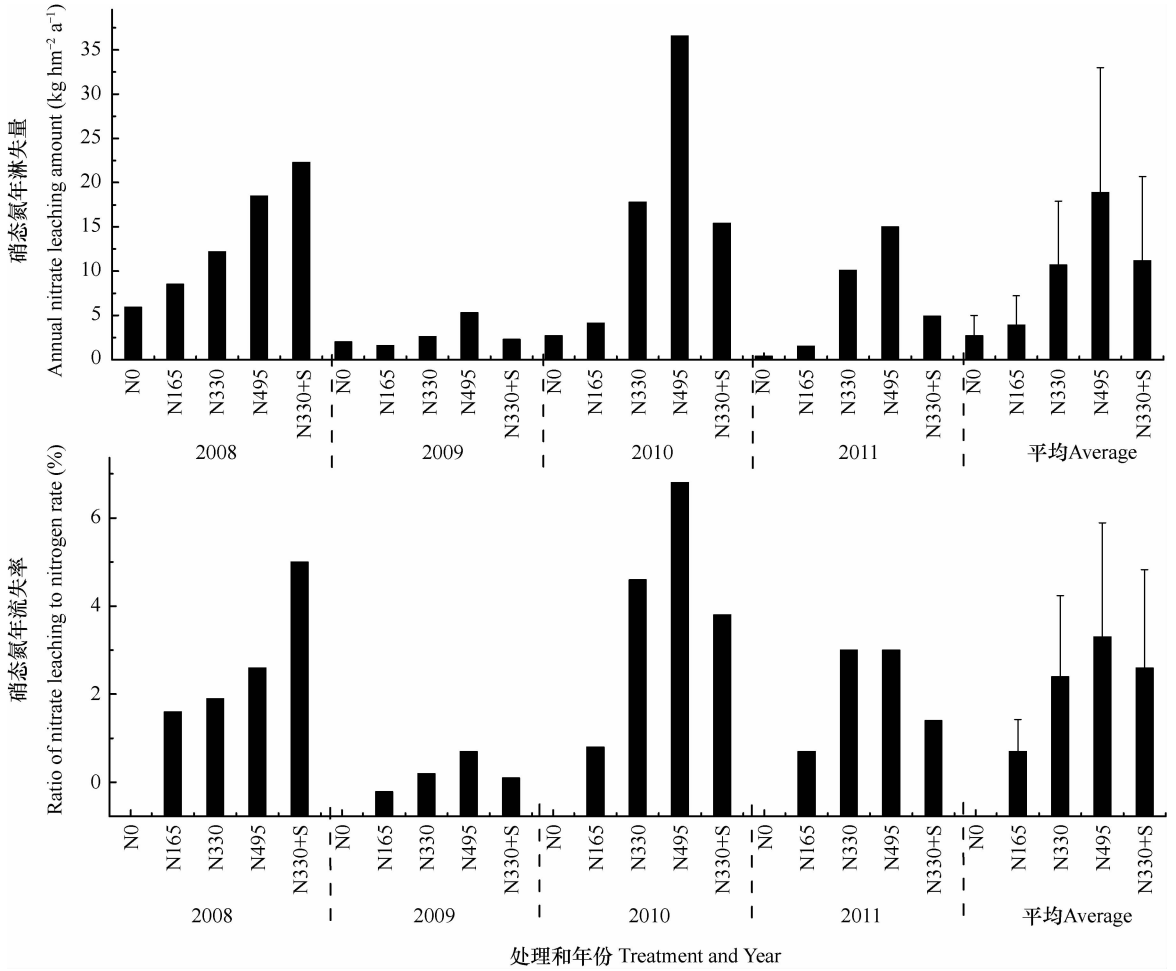


图 4 2008 - 2011 年各处理硝态氮年流失总量和年流失率

Fig. 4 Annual total nitrate loss through leaching and annual nitrate loss rate as affected by treatment during the years of 2008 - 2011

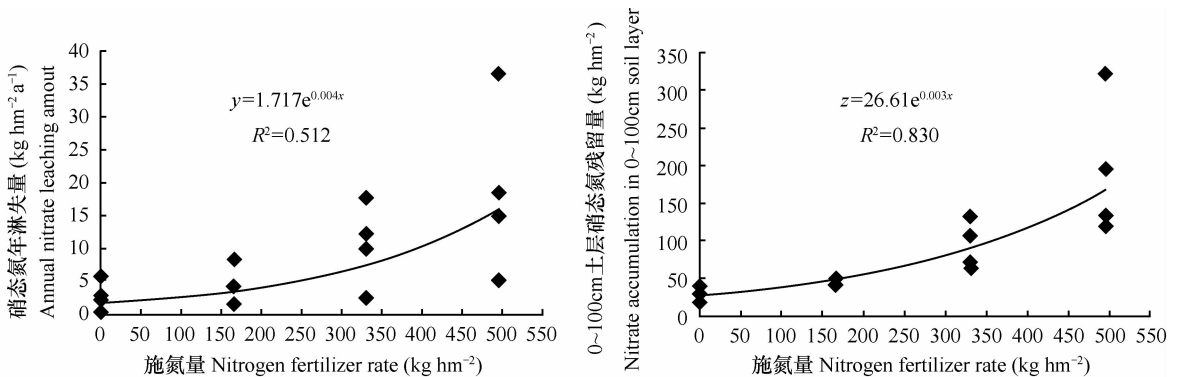


图 5 硝态氮年淋失量、0 ~ 100 cm 土层残留量与施氮量的关系

Fig. 5 Relationships of annual nitrate leaching loss and nitrate accumulation in the 0 ~ 100 cm soil layer with nitrogen fertilizer application rate

### 3 讨 论

以往对降水量在 400 ~ 700 mm 左右的中国北方地区土壤氮素淋洗重视不够,认为这些地区降水量较少,淋洗不可能发生。事实上,这些地区降水量虽少,却主要集中在 7 - 9 月内,季节性频发的降雨仍可将氮素淋洗至较深土层<sup>[15]</sup>。吕殿青等<sup>[13]</sup>和李世清和李生秀<sup>[16]</sup>先后指出,在半干旱地区,硝态氮淋失仍可发生,淋失量和降水量有密切关系。本研究结果再次证实,硝态氮可被淋洗至 100 cm 土层以下,监测期内共发生了 12 次淋溶,其中 7 次为降雨所致,且集中在 7、8、9 月份,年际间变异较大。然而,硝态氮淋失量和降雨量并没有表现出很好的相关性。同一年份内某一次较大的降水不一定会导致较多的硝态氮淋失,淋失量除与降雨量有关外,还与单次降雨强度、降雨和施肥时间、作物生长阶段和土壤干湿状况等因素有关。在不同年份,一个监测周期内的硝态氮淋溶往往由为数不多的几次强降雨或灌溉造成,所以整个年度的降雨量很难与淋失量有很好的相关性。 $\text{NO}_3^-$ -N 在土壤剖面中累积是其发生淋失的先决条件,累积量越大,淋失的风险越大,而累积量与施氮量密切相关<sup>[17-20]</sup>。李宗新等<sup>[21]</sup>指出,硝态氮累计淋失量可占施氮量的 3.5% ~ 11.5%,且二者呈正相关。本研究发现,1 m 土层  $\text{NO}_3^-$ -N 累积量、90 cm 处  $\text{NO}_3^-$ -N 年淋失量均随施氮量的增加呈指数形式增长,可见,施氮量越高, $\text{NO}_3^-$ -N 累积量和年淋失量越高,二者占施氮量的比例也越高。结合产量数据,当年施氮量为 330 kg  $\text{hm}^{-2}$  (小麦季:150 kg  $\text{hm}^{-2}$ 、玉米季:180 kg  $\text{hm}^{-2}$ ) 时,作物可连续多年获得高产,而此时按方程估算的  $\text{NO}_3^-$ -N 淋失量为 6.5 kg  $\text{hm}^{-2}$ ,仅占年施氮量的 2.0% 左右,可作为本地区小麦、玉米兼顾产量和环境友好的氮肥推荐量。

本试验条件下,每季作物秸秆还田 5 000 kg  $\text{hm}^{-2}$  并未在当季或当年表现出增产效果。数据显示,2 年后开始显著增产,2010 年、2011 年增幅分别为 14.9% 和 14.2%。这是因为秸秆腐解需要较长时间进行,至 2011 年玉米收获时,秸秆还田处理较未还田处理其耕层土壤有机质、全氮和速效钾含量分别提高了 10.5%、38.9% 和 21.8%,差异达显著性水平。然而,秸秆还田对  $\text{NO}_3^-$ -N 在土壤剖面中的分布、累积和淋溶没有显著影响,这与李宗新等<sup>[21]</sup>的研究结论不一致。他指出,与施氮肥处理相比,秸

秆还田配施氮肥可加剧土壤水淋溶,秸秆还田配施氮肥的氮素淋失率较单施氮肥高 6.53% ~ 13.07%,这可能与土壤类型、气候特征和秸秆还田量等因素存在差异有关,具体原因有待进一步通过试验验证分析。

$\text{NO}_3^-$ -N 在土壤剖面中的累积和移动受残留量,施氮量、施氮方法、降雨量和灌溉量等因素的影响,存在着非常大的年际变化,仅依据一季或两季的观测很难对  $\text{NO}_3^-$ -N 的移动和淋洗作出评价<sup>[22]</sup>。李世清和李生秀<sup>[16]</sup>也认为评价半干旱地区农田生态系统中  $\text{NO}_3^-$ -N 的淋失,仅靠一、二季作物的试验结果,难以反映不同降水年型下的淋失量和变异性。本试验历时 4 a 8 季作物,期间经历了不同的降雨年份和天气状况,试验结果具有较好的代表性,能较好反映本地区  $\text{NO}_3^-$ -N 淋洗的实际水平。结果表明, $\text{NO}_3^-$ -N 年淋失量和淋失率年际间变异较大,4 a 平均淋失量为 2.7 ~ 18.9 kg  $\text{hm}^{-2}$ ,淋失率为 0.7 ~ 3.3%,相当于年流失尿素 5.9 ~ 41.0 kg  $\text{hm}^{-2}$ ,这与高忠霞等<sup>[23]</sup>在本地区测定的 1.17 ~ 22.12 kg  $\text{hm}^{-2}$  的淋失量十分接近,较少的氮素淋失量可能与壤土剖面 80 ~ 120 cm 土层范围内存在的黏化层有关<sup>[13,24]</sup>。

关于氮素淋洗,不同学者在认识上有差别。农学家一般认为氮素移动出作物根系活动层以外则视为淋洗,而环境学家则认为氮素进入水体后才可以视为淋洗<sup>[15]</sup>。在本研究中,将 90 cm 土层视为硝态氮淋洗的界面,是考虑到作物根系的主要吸收区域位于该土层以上,淋洗至该土层以下的硝态氮很难再被作物吸收利用<sup>[14]</sup>。然而,又有研究指出<sup>[25]</sup>,淋失至 100 cm 土层以下的硝态氮仍可被作物吸收利用。但是,淋失至 100 cm 土层以下的硝态氮可能继续向下淋溶至深土层以反硝化气体形式损失或进入地下水,即便作物吸收利用,吸收的量也应该是非常有限的。

### 4 结 论

在降雨量位于 600 mm 左右的陕西关中小麦-玉米轮作区,农田硝态氮的淋洗主要发生在雨热同期的玉米生长季,且往往由为数不多的几次强降雨或灌溉所致。由于受降雨量、降雨时间、降雨强度、土壤干湿状况和作物蒸腾等多种因素的综合影响,硝态氮淋失量年际间存在较大变异,与年降雨量之间没有表现出很好的相关性。随着氮肥投入量的增

加,小麦、玉米产量并不按比例相应增加,而是缓慢增加或不增加,呈现报酬递减的规律。小麦施氮  $150 \text{ kg hm}^{-2}$ 、玉米施氮  $180 \text{ kg hm}^{-2}$ 时,连续 4 a 作物均能获得相对高产。施氮量继续增加,产量不再增加,0 ~ 100 cm 土层  $\text{NO}_3^-$ -N 累积量和 90 cm 处  $\text{NO}_3^-$ -N 淋失量却以指数形式快速增加,施氮量越高, $\text{NO}_3^-$ -N 累积量和年淋失量越高,二者占施氮量的比例也越高。每季作物增加  $5000 \text{ kg hm}^{-2}$  秸秆还田两年后可显著提高作物产量,但对  $\text{NO}_3^-$ -N 累积和淋溶的影响不明显。

## 参考文献

- [ 1 ] 串丽敏,赵同科,安志装,等. 土壤硝态氮淋溶及氮素利用研究进展. 中国农学通报,2010,26(11):200—205. Chuan L M, Zhao T K, An Z Z, et al. Research advancement in nitrate leaching and nitrogen use in soils (In Chinese). Chinese Agricultural Science Bulletin, 2010, 26(11): 200—205
- [ 2 ] 李世娟,李建民. 氮肥损失研究进展. 农业环境保护,2001,20(5):377—379. Li S J, Li J M. Research progress on losses of fertilizer nitrogen (In Chinese). Agro-environmental Protection, 2001, 20(5): 377—379
- [ 3 ] 王秀丽,孙波. 红壤旱地施用有机肥的氮素淋失过程. 土壤学报,2008,45(4):745—749. Wang X L, Sun B. Nitrogen leaching in upland red soil applied with dairy manure (In Chinese). Acta Pedologica Sinica, 2008, 45(4): 745—749
- [ 4 ] 陈晓歌. 黄土层中氮素运移试验研究及数学模拟分析. 陕西:西北农林科技大学水利与建筑工程学院,2008. Chen X G. Studies and mathematic simulation on nitrogen movement in loess layers (In Chinese). Shannxi: College of Water Conservancy and Architectural Engineering, Northwest A&F University, 2008
- [ 5 ] 唐吴治,韩勇,黄俏丽. 一个稻田土壤-作物体系的氮素循环模型. 土壤,2006,38(6):717—726. Tang H Y, Han Y, Huang Q L. A deterministic model of the nitrogen cycle in soil-crop systems in rice paddy soils of Chinese Taihu region (In Chinese). Soils, 2006, 38(6): 717—726
- [ 6 ] 王晓英,贺明荣,刘永环,等. 水氮耦合对冬小麦氮肥吸收及土壤硝态氮残留淋溶的影响. 生态学报,2008,28(2):685—694. Wang X Y, He M R, Liu Y H, et al. Interactive effects of irrigation and nitrogen fertilizer on nitrogen fertilizer recovery and nitrate-N movement across soil profile in a winter wheat field (In Chinese). Acta Ecologica Sinica, 2008, 28(2): 685—694
- [ 7 ] 胡立峰,胡春胜,安忠民,等. 不同土壤耕作法对作物产量及土壤硝态氮淋失的影响. 水土保持学报,2005,19(6):186—189. Hu L F, Hu C S, An Z M, et al. Effects of different tillage patterns on crop yields and nitrate leaching in soil (In Chinese). Journal of Soil and Water Conservation, 2005, 19(6): 186—189
- [ 8 ] 车明超,黄占斌,王晓茜,等. 施用保水剂对土壤氮素淋溶及脲酶活性的影响. 农业环境科学学报,2010,29(增刊):93—97. Che M C, Huang Z B, Wang X Q, et al. Effects of SAP application on nitrogen eluviations and the urease activity of soil (In Chinese). Journal of Agro-Environment Science, 2010, 29(Suppl): 93—97
- [ 9 ] 张贵龙,任天志,李志宏,等. 施氮量对白萝卜硝酸盐含量和土壤硝态氮淋溶的影响. 植物营养与肥料学报,2009,15(4):877—883. Zhang G L, Ren T Z, Li Z H, et al. Effects of nitrogen fertilization on nitrate content of radish and soil nitrate leaching (In Chinese). Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2009, 15(4):877—883
- [ 10 ] 项琳琳,赵牧秋,王俊,等. 双氰胺对设施菜地土壤硝酸盐淋溶和苦苣硝酸盐累积的影响. 农业环境科学学报,2009,28(9):1965—1969. Xiang L L, Zhao M Q, Wang J, et al. Effects of dicyandiamide on soil nitrate leaching and nitrate accumulation in chicory under protected cultivation (In Chinese). Journal of Agro-Environment Science, 2009, 28(9): 1965—1969
- [ 11 ] 屈兴红,何文寿,何进智,等. 填闲作物防治保护地土壤硝酸盐淋溶损失的研究进展. 农业科学研究,2007,28(2):72—75. Qu X H, He W S, He J Z, et al. Progress of control of nitrate leaching in vegetable fields by using nitrogen catch crops (In Chinese). Journal of Agricultural Sciences, 2007, 28(2): 72—75
- [ 12 ] 刘微,赵同科,王丽英. 不同水分、施氮量对土壤中硝态氮含量分布的影响. 华北农学报,2006,21(3):27—30. Liu W, Zhao T K, Wang L Y. Effect of irrigation and nitrogen fertilizer on  $\text{NO}_3^-$ -N content and distribution in soil (In Chinese). Acta Agriculturae Boreali-Sinica, 2006, 21(3): 27—30
- [ 13 ] 吕殿青,杨学云,张航,等. 陕西壤土中硝态氮运移特点及影响因素. 植物营养与肥料学报,1996,2(4):289—296. Lu D Q, Yang X Y, Zhang H, et al. Study on the characteristics of movement and leaching loss of  $\text{NO}_3^-$ -N in Lou soil in Shaanxi and its influencing factors (In Chinese). Plant Nutrition and Fertilizing Science, 1996, 2(4): 289—296
- [ 14 ] 袁新民,杨学云,同延安,等. 不同施氮量对土壤  $\text{NO}_3^-$ -N 累积的影响. 干旱地区农业研究,2001,19(1):8—13. Yuan X M, Yang X Y, Tong Y A, et al. Effect of N fertilizer rate on soil nitrate nitrogen accumulation (In Chinese). Agricultural Research in the Arid Areas, 2001, 19(1): 8—13
- [ 15 ] 赵荣芳,陈新平,张福锁. 华北地区冬小麦-夏玉米轮作体系的氮素循环与平衡. 土壤学报,2009,46(4):684—697. Zhao R F, Chen X P, Zhang F S. Nitrogen cycling and balance in winter wheat and summer maize rotation system in northern China plain (In Chinese). Acta Pedologica Sinica, 2009, 46(4): 684—697
- [ 16 ] 李世清,李生秀. 半干旱地区农田生态系统中硝态氮的淋失. 应用生态学报,2000,11(2):240—242. Li S Q, Li S X. Leaching loss of nitrate from semi-arid area agro-ecosystem (In Chinese). Chinese Journal of Applied Ecology, 2000, 11(2): 240—242
- [ 17 ] 叶灵,巨晓棠,刘楠,等. 华北平原不同农田类型土壤硝态氮累积及其对地下水的的影响. 水土保持学报,2010,24(2):165—168. Ye L, Ju X T, Liu N, et al. Characteristics of nitrate



- accumulation and its effects on groundwater under typical cropping systems in north China plain (In Chinese). *Journal of Soil and Water Conservation*, 2010, 24(2): 165—168
- [18] 尹晓芳, 同延安, 张树兰, 等. 关中地区小麦/玉米轮作农田硝态氮淋溶特点. *应用生态学报*, 2010, 21(3): 640—646. Yin X F, Tong Y A, Zhang S L, et al. Nitrate leaching characteristics of wheat-corn rotation farmland in Guanzhong area of Shaanxi (In Chinese). *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2010, 21(3): 640—646
- [19] 苏涛, 王朝辉, 李生秀. 黄土高原地区农田土壤的硝态氮残留及其生态效应. *农业环境科学学报*, 2004, 23(2): 411—414. Su T, Wang Z H, Li S X. Nitrate residues in farmland soils of Loess Plateau and its ecological effects (In Chinese). *Journal of Agro-Environment Science*, 2004, 23(2): 411—414
- [20] 同延安, Ove E, 张树兰, 等. 陕西省氮肥过量施用现状评价. *中国农业科学*, 2004, 37(8): 1239—1244. Tong Y A, Ove E, Zhang S L, et al. Evaluation of over-application of nitrogen fertilizer in China's Shaanxi Province (In Chinese). *Scientia Agricultura Sinica*, 2004, 37(8): 1239—1244
- [21] 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. *应用生态学报*, 2008, 19(1): 65—70. Li Z X, Dong S T, Wang K J, et al. Soil nutrient leaching patterns in maize field under different fertilizations: An in situ study (In Chinese). *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2008, 19(1): 65—70
- [22] 巨晓棠, 刘学军, 张福锁. 冬小麦/夏玉米轮作中  $\text{NO}_3^-$ -N 在土壤剖面的累积及移动. *土壤学报*, 2003, 40(4): 538—546. Ju X T, Liu X J, Zhang F S, et al. Accumulation and movement of  $\text{NO}_3^-$ -N in soil profile in winter wheat and summer maize rotation system (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2003, 40(4): 538—546
- [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. *农业环境科学学报*, 2010, 29(8): 1624—1632. Gao Z X, Yang X Y, Zhou J B, et al. Forms and amounts of nitrogen in leachates affected by different fertilizations after one wheat-maize rotation (In Chinese). *Journal of Agro-Environment Science*, 2010, 29(8): 1624—1632
- [24] 同延安, 石维, 吕殿青, 等. 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. *植物营养与肥料学报*, 2005, 11(4): 435—441. Tong Y A, Shi W, Lv D Q, et al. Relationship between soil texture and nitrate distribution and accumulation in three types of soil profile in Shaanxi (In Chinese). *Plant Nutrition and Fertilizing Science*, 2005, 11(4): 435—441
- [25] 王西娜, 王朝辉, 李生秀. 黄土高原旱地冬小麦/夏玉米轮作体系土壤的氮素平衡. *植物营养与肥料学报*, 2006, 12(6): 759—764. Wang X N, Wang Z H, Li S X. Soil nitrogen balance in winter wheat and summer maize rotation system on dryland of Loess Plateau (In Chinese). *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2006, 12(6): 759—764

## EFFECTS OF APPLICATION OF NITROGEN FERTILIZER AND INCORPORATION OF STRAW ON NITRATE LEACHING IN FARMLAND UNDER WHEAT-MAIZE ROTATION SYSTEM

Yang Xianlong<sup>1,2</sup> Lu Yongli<sup>1,2</sup> Tong Yan'an<sup>1,2†</sup> Lin Wen<sup>1,2</sup> Liang Ting<sup>1,2</sup>

(1 College of Resources and Environment Sciences, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

(2 Key Laboratory of Plant Nutrition and the Agri-environmental in Northwest China Ministry of Agriculture, Yangling, Shaanxi 712100, China)

**Abstract** A four-year stationary field experiment, using the lysimeter method, was conducted to investigate effects of application of nitrogen fertilizer and incorporation of straws on nitrate leaching in the soil layer, 90 cm in depth, in a field under wheat and maize rotation in Guanzhong Plain of Shaanxi Province. Results show that nitrate leaching varied sharply in a year and occurred mainly in July, August and September, the rainy season of the year, and could be observed after flood irrigation, too. The nitrate concentration in the leachate and nitrate leaching loss in the whole monitored period was 0 ~ 103.5 mg L<sup>-1</sup> and 0 ~ 21.8 kg hm<sup>-2</sup>, respectively, and both displayed an increasing trend along with nitrogen application rate. The crops gained relatively high yields (14.4 t hm<sup>-2</sup> on average) in all the 4 years, when 330 kg hm<sup>-2</sup> N (150 kg hm<sup>-2</sup> N for wheat and 180 kg hm<sup>-2</sup> N for corn) was applied for the wheat/maize rotation system. Any further increase in nitrogen application rate did not bring about increase in crop yield, but enhanced accordingly nitrate accumulation in the soil profile and nitrate leaching loss monitored at the depth of 90 cm of the profile. Straw incorporation showed

some yield increasing effect only two years later. Compared with Treatment N330, Treatment N330 + S increased yield of the crops by 15.1% and 14.2% in 2010 and 2011, respectively. However, no significant effects were observed on nitrate accumulation and leaching. Regression analysis of the data exposed an positive exponential relationship of nitrate accumulation in the 0 ~ 100 cm soil layer and nitrate leaching loss with annual nitrogen application rate, which means that the higher the nitrogen application rate, the higher the nitrate accumulation, the higher the nitrate leaching loss, and the higher the proportions of the two to the total nitrate applied.

**Key words** Nitrogen application rate; Straw incorporation; Wheat-maize rotation system; Nitrate; Leaching

(责任编辑:汪叔生)