

# 施氮水平与模拟降雨 pH 值对玉米冠层 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 淋失的影响

王丽梅<sup>1,3</sup>, 李世清<sup>1,2\*</sup>, 邵明安<sup>2</sup>

(1. 西北农林科技大学黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 杨凌 712100; 2. 中科院水利部水土保持研究所, 杨凌 712100; 3. 西北农林科技大学资源环境学院, 杨凌 712100)

**摘要:** 为探明降雨特别是酸雨对玉米冠层氮素淋失的影响, 以盆栽试验春玉米为指示作物, 采用自制人工降雨器进行模拟降雨, 研究施氮与不施氮(对照)条件下玉米冠层 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 淋失动态、数量及随生育期和降雨酸度的变化规律。结果表明, 中性和弱酸性降雨淋洗, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 淋失量主要由冠层氮素含量决定, 而强酸雨淋洗, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 淋失量受降雨 pH 值和冠层氮素含量共同影响。各生育期玉米冠层 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 淋失量随降雨 pH 值降低变化规律不一, 生育前期降雨 pH 值对冠层 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 淋失影响较生育后期显著, 在研究降雨酸度对玉米冠层 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 淋失的影响时, 必须考虑生育期。相同 pH 值模拟降雨条件下, 玉米冠层 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 淋失量随生育期推进逐渐降低: 11 叶期>吐丝期>灌浆期, 生育前期显著高于中后期。玉米冠层 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 淋失量不仅与介质施氮有关, 同时受降雨 pH 值影响, 2 因素在不同生育期对 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 淋失贡献大小有所不同, 但总体看, 植物体氮素丰富程度是影响冠层 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 淋失的主要因素。各生育期玉米冠层均存在一定数量的 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 淋失, 尤以生育前期为甚, 说明在研究农田生态系统氮素流量和冠层氮素损失时, 冠层氮素淋失应予以考虑。

**关键词:** 氮, 降雨, pH, 玉米, 冠层 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 淋失

doi: 10.3969/j.issn.1002-6819.2011.06.012

中图分类号: S143.1

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2011)-06-0066-07

王丽梅, 李世清, 邵明安, 等. 施氮水平与模拟降雨 pH 值对玉米冠层 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 淋失的影响[J]. 农业工程学报, 2011, 27(6): 66-72.

Wang Limei, Li Shiqing, Shao Ming'an, et al. Effects of N application and simulated rainfall pH value on NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N leaching loss from canopy of maize[J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(6): 66-72. (in Chinese with English abstract)

## 0 引言

植物冠层养分淋洗是指无机和有机代谢物被水溶液(雨水、雾、露等)从植物地上部分带走的过程<sup>[1]</sup>。Tukey<sup>[1]</sup>指出, 种植在大田和温室中植物叶片矿质养分含量差异甚大, 如果对种植在室外的植物进行遮雨, 则与温室中植物叶片养分含量基本一致, 原因是矿质养分可在大田条件下被雨水淋洗损失。已有研究表明, 植物体内许多无机和有机物质均可被水溶液从植物地上部淋洗出来<sup>[2-4]</sup>。夏阳等发现, 酸性降雨对植物体无机物质的淋失量明显高于中性降雨<sup>[5-6]</sup>。

植物冠层氮素淋失是土壤-植物系统氮素循环的重要组成部分, 在决定氮素利用和生态系统氮素平衡方面具有重要作用<sup>[7]</sup>。养分类型、养分含量(特别是质外体中可溶性养分含量)、降雨接触时间、植物类型、雨水 pH 值、土壤水分状况等均影响冠层养分淋失速率和数量<sup>[1-2,8]</sup>, 与介质施氮和水分供应条件密切相关的植物体氮素含量是冠层氮素淋失的基础<sup>[9]</sup>。

过去, 植物冠层养分淋失研究大部分局限于森林冠层<sup>[10-12]</sup>, 对农田养分淋失研究大多集中于土壤养分<sup>[13-14]</sup>, 而对农田作物冠层养分淋失研究较少, 对作物冠层氮素淋失随生育期和降雨酸度变化规律的研究更是鲜见报道。由于施肥等原因, 农田作物冠层氮素比森林冠层更加丰富, 即被降雨淋洗的“氮源”更大, 受降雨酸度影响应更为显著, 本文基于此假设, 以不同氮素供应处理的盆栽试验春玉米为指示作物, 采用自制人工降雨器进行不同 pH 值模拟降雨, 研究玉米冠层 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 淋失动态、数量、及随生育期和降雨酸度的变化规律, 以期为降雨特别是酸雨对农田作物冠层氮素淋失的影响提供有关证据和基础科学数据, 同时深化对农田作物冠层氮素损失途径和农田生态系统氮素平衡更加准确和可靠的认识。

## 1 材料与方法

### 1.1 盆栽试验材料与设计

盆栽试验于 2008 年在西北农林科技大学黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室植物营养试验场进行。供试玉米品种为大叶型兴玉 998; 供试土壤为土垫旱耕人为土(石灰性土壤), 取 0~20 cm 耕层土壤, 土壤质地为黏壤土, 基本肥力状况为: 有机质 7.40 g/kg, 全氮 0.92 g/kg, 有效磷 3.05 mg/kg, 速效钾 104.30 mg/kg, 土壤 pH 值为 8.1, 田间持水率 24% (质量含水率)。采用上底直径 32 cm、下底直径 24 cm 和高 29 cm 的盆钵进行盆栽试验。

收稿日期: 2010-09-09 修订日期: 2011-06-07

基金项目: 国家自然科学基金(30670326, 30571116)、中国科学院西部之光项目(2006LH01)

作者简介: 王丽梅(1972-), 女, 山东平度人, 主要从事植物生理生态研究。杨凌 西北农林科技大学黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 712100。Email: lmwang0125@yahoo.cn

\*通信作者: 李世清(一)。杨凌 西北农林科技大学黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 712100。Email: sqli@ms.iswc.ac.cn

介质施氮设不施氮（用  $\text{N}_0$  表示）和 1 kg 干土施氮 0.20 g（用  $\text{N}_2$  表示）2 个水平；水分供应均为充分供水处理，维持土壤含水率为田间持水率的  $75\pm 5\%$ ；盆栽试验均以磷肥为底肥（按 1 kg 干土 0.15 g  $\text{P}_2\text{O}_5$  量施入）。每盆装风干土（过 4 mm 筛孔）12 kg，装土前盆内插入直径 4 cm 的 PVC 管用于灌水，并在管下放置几块鹅卵石以利灌水。以尿素为氮源， $\text{KH}_2\text{PO}_4$  为磷源，按设计用量将肥料与干土拌匀后装盆。装盆时先将 11.25 kg 干土装入，通过 PVC 管灌水至田间持水率后，播入 3 粒种子，再将剩余 0.75 kg 干土均匀覆于种子上面。2008-04-23 播种，三叶期定苗，每盆留 1 株，每天用感量 1 g 的 DY20K 型电子天平称质量，低于控水下限补水。

## 1.2 降雨试验材料与设计

采用自制针头式人工降雨器进行模拟降雨（图 1），通过水泵调节降雨槽内水位以控制雨强，同时配备振荡器以保证降雨均匀，降雨器用抗酸腐蚀的不锈钢材料制成。经冠层到达地表降雨淋洗液用圆柱形不锈钢收集器收集（如图 1 所示），该收集器高 25 cm，上部开口直径略大于玉米冠层垂直投影面积，在下底中心位置处预留一与玉米茎秆直径相当的圆形小孔，并沿中心线将收集器分割为左右两半，以便于将收集器套在玉米茎秆基部；每半边收集器外缘均设一直径 1 cm 的引流小孔，小孔下焊接不锈钢出流管。降雨时将收集器套于玉米茎秆基部，出流管下接塑料软管，管的另一端放置在塑料小桶中，用以收集淋洗液。密封收集器中缝接口、收集器与茎秆接触处以及收集器与塑料软管接口，以防淋洗液漏失。

降雨酸度设 pH 值 7.0、pH 值 5.0 和 pH 值 4.0 三个水平，用去离子水加硫酸配制而成。雨前拭去叶片和茎秆表面灰尘等杂质，降雨过程中每 10 min 收集一次经塑料软管流入小桶中的淋洗液，称质量后迅速转入水样采集瓶密封并放回实验室冷藏保存备用，连续降雨 1 h，相当于 22.8 mm 降雨量，雨强一致。淋洗对照为相同环境条件下的空旷地模拟降雨。

分别于播种后 57 d（11 叶期）、74 d（吐丝期）和 91 d（灌浆期）进行模拟降雨，各生育期同一处理每 pH 值降雨均重复 3 次。每次降雨后收获地上部玉米植株，将植物样品烘干、称质量，分析养分含量。



图 1 降雨淋洗试验装置

Fig.1 Experiment device of rainfall leaching

## 1.3 测定项目与方法

### 1.3.1 冠层淋洗液中 $\text{NO}_3^-$ -N 含量

用流动分析仪（AutoAnalyzer 3，德国 Bran+Luebbe 公司制造）测定。

### 1.3.2 植物样全氮含量

植物干样经浓  $\text{H}_2\text{SO}_4$ - $\text{H}_2\text{O}_2$  法消解后，用自动定氮仪（KJELTEC 2300，瑞典 FOSS TECATOR 公司制造）测定。

## 1.4 数据处理与分析

玉米冠层  $\text{NO}_3^-$ -N 淋失量 = (冠层淋洗液  $\text{NO}_3^-$ -N 浓度 - 空旷地对照淋洗液  $\text{NO}_3^-$ -N 浓度) × 冠层淋洗液体积

玉米冠层  $\text{NO}_3^-$ -N 淋失速率：以每 10 min 降雨历程  $\text{NO}_3^-$ -N 淋失量作为  $\text{NO}_3^-$ -N 淋失速率

玉米冠层氮素累积量 = 单位干质量全氮含量 × 玉米冠层干质量

数据采用 Excel 和 SPSS 软件进行处理和统计分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 介质施氮与降雨 pH 值对玉米冠层 $\text{NO}_3^-$ -N 淋失速率的影响

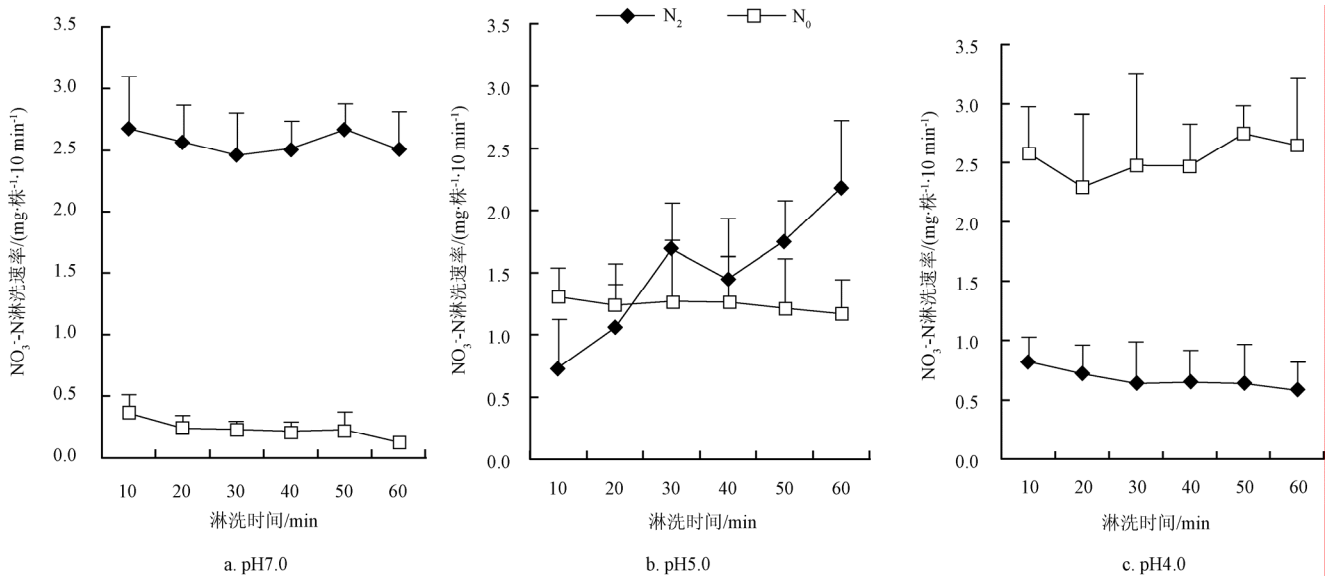
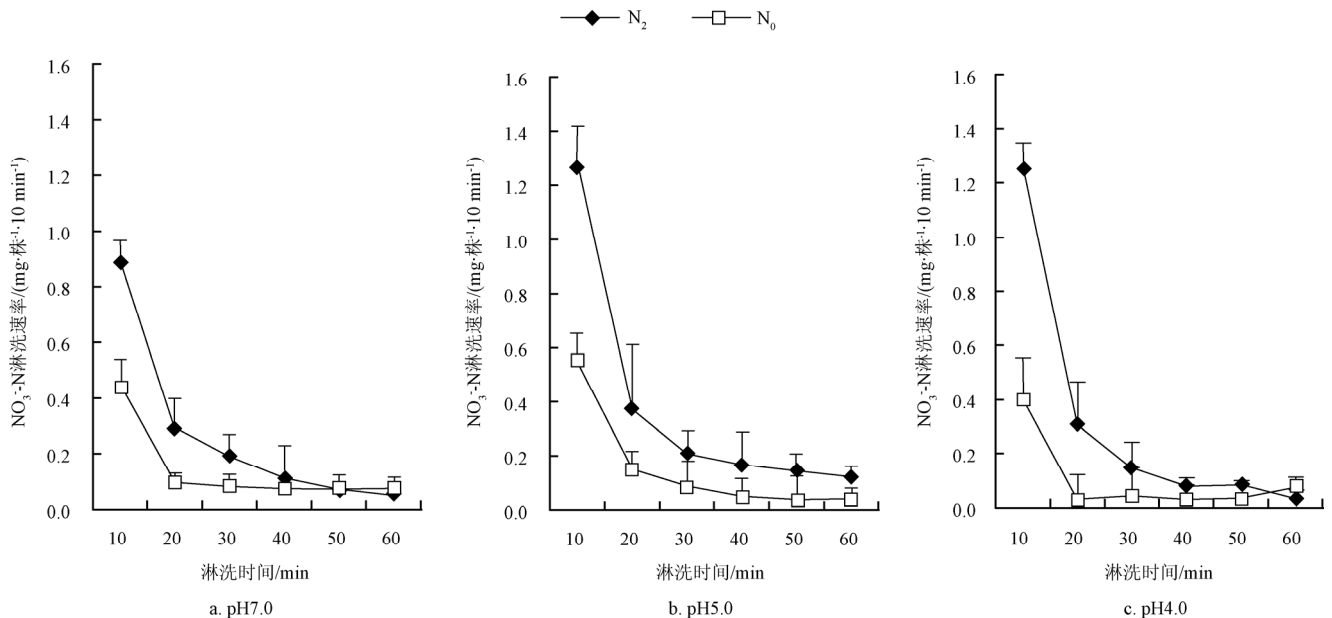
#### 2.1.1 介质施氮与降雨 pH 值对 11 叶期冠层 $\text{NO}_3^-$ -N 淋失速率的影响

11 叶期进行的模拟降雨表明，降雨 pH 值为 7.0 时（图 2a），玉米冠层  $\text{NO}_3^-$ -N 淋失速率随淋洗时间总体呈降低趋势。施氮处理（ $\text{N}_2$ ）玉米冠层  $\text{NO}_3^-$ -N 淋失速率显著高于不施氮处理（ $\text{N}_0$ ）（ $P < 0.01$ ），说明该降雨条件下施氮可显著增加 11 叶期玉米冠层  $\text{NO}_3^-$ -N 淋失量。降雨 pH 值为 5.0 时（图 2b），施氮处理玉米冠层  $\text{NO}_3^-$ -N 淋失速率随淋洗时间呈增加趋势，不施氮处理淋失速率在整个淋洗过程中基本不变，施氮处理冠层  $\text{NO}_3^-$ -N 淋失平均速率也明显高于不施氮处理。降雨 pH 值为 4.0 时（图 2c），不施氮处理  $\text{NO}_3^-$ -N 淋失速率基本不受降雨时段影响，施氮处理则随降雨淋洗时间延长呈下降趋势，施氮处理  $\text{NO}_3^-$ -N 淋失速率显著低于不施氮处理（ $P < 0.01$ ），与 pH 值为 7.0 降雨时完全相反。

由图 2 可见，11 叶期施氮与不施氮处理冠层  $\text{NO}_3^-$ -N 淋失速率对降雨 pH 值的响应不一。pH 值 7.0 和 5.0 降雨淋洗，施氮处理玉米冠层  $\text{NO}_3^-$ -N 平均淋失速率均高于不施氮处理，而 pH 值 4.0 降雨时，施氮处理玉米冠层  $\text{NO}_3^-$ -N 淋失速率反而显著小于不施氮处理，说明该生育期在中性和弱酸性降雨淋洗条件下，玉米冠层  $\text{NO}_3^-$ -N 淋失量受介质施氮影响明显，而在强酸性降雨淋洗条件下，玉米冠层  $\text{NO}_3^-$ -N 淋失量受介质施氮和降雨 pH 值综合影响。

#### 2.1.2 介质施氮与降雨 pH 值对吐丝期冠层 $\text{NO}_3^-$ -N 淋失速率的影响

吐丝期进行的降雨淋洗结果表明，各处理冠层  $\text{NO}_3^-$ -N 淋失速率随淋洗时间均呈降低趋势（图 3），降雨前 30 min 冠层  $\text{NO}_3^-$ -N 淋失速率随淋洗时间降幅较大，之后淋失速率趋于平稳。各 pH 降雨玉米冠层  $\text{NO}_3^-$ -N 淋失速率均为施氮处理显著高于不施氮处理（ $P < 0.05$ ），说明该生育期介质施氮是影响玉米冠层  $\text{NO}_3^-$ -N 淋失的主要因素。

图2 介质施氮与降雨 pH 值对 11 叶期玉米冠层  $\text{NO}_3\text{-N}$  淋失速率的影响Fig.2 Effects of rainfall pH and N application on  $\text{NO}_3\text{-N}$  leaching loss from maize canopy during 11-leaf period图3 介质施氮与降雨 pH 值对吐丝期玉米冠层  $\text{NO}_3\text{-N}$  淋失速率的影响Fig.3 Effects of rainfall pH and N application on  $\text{NO}_3\text{-N}$  leaching loss from maize canopy during spinning period

### 2.1.3 介质施氮与降雨 pH 值对灌浆期冠层 $\text{NO}_3\text{-N}$ 淋失速率的影响

灌浆期除不施氮处理冠层  $\text{NO}_3\text{-N}$  淋失速率在 pH7.0 降雨中有波动外 (图 4a), 其余处理冠层  $\text{NO}_3\text{-N}$  淋失速率随降雨进程均呈降低趋势 (图 4)。从  $\text{NO}_3\text{-N}$  1 h 平均淋失速率看, 各 pH 降雨条件下, 施氮处理均高于不施氮处理, 说明施氮是影响  $\text{NO}_3\text{-N}$  淋失量的主导因素之一。此外, 施氮处理 pH4.0 模拟降雨冠层  $\text{NO}_3\text{-N}$  淋失速率反而比 pH5.0 时低, 说明  $\text{NO}_3\text{-N}$  淋失也与降雨 pH 值有关。

### 2.2 介质施氮与降雨 pH 值对冠层 $\text{NO}_3\text{-N}$ 1 h 淋失量的影响

11 叶期, 施氮处理玉米冠层  $\text{NO}_3\text{-N}$  1 h 淋失量随降雨 pH 值降低而降低 (表 1), 降雨 pH 为 7.0 时冠层  $\text{NO}_3\text{-N}$  淋失量最大, pH4.0 时淋失量最小; 不施氮处理玉米冠层  $\text{NO}_3\text{-N}$  淋失量随降雨 pH 值降低而显著增加。吐丝期和

灌浆期, 无论施氮与否, 冠层  $\text{NO}_3\text{-N}$  淋失量随降雨 pH 值降低均呈单峰曲线变化趋势, 以 pH5.0 模拟降雨时冠层  $\text{NO}_3\text{-N}$  淋失量最大。显然, 各生育期玉米冠层  $\text{NO}_3\text{-N}$  淋失量随降雨 pH 值变化规律不一。因此, 在研究降雨酸度对玉米冠层  $\text{NO}_3\text{-N}$  淋失的影响时, 必须考虑生育期。由表 1 还可看出, 生育前期 (11 叶期) 施氮与不施氮处理  $\text{NO}_3\text{-N}$  淋失量随降雨 pH 变化趋势截然相反, 且相同施氮处理不同 pH 降雨间冠层  $\text{NO}_3\text{-N}$  淋失量差异显著, 施氮处理 pH7.0 降雨与 pH4.0 降雨冠层  $\text{NO}_3\text{-N}$  淋失量相差 2.8 倍, 不施氮处理相差高达 10.1 倍。生育中、后期 (吐丝期、灌浆期) 施氮与不施氮处理冠层  $\text{NO}_3\text{-N}$  淋失量随降雨 pH 值降低变化趋势一致, 先增加后降低, 且相同施氮处理不同 pH 降雨冠层  $\text{NO}_3\text{-N}$  淋失量相差较小, 远不及生育前期显著。

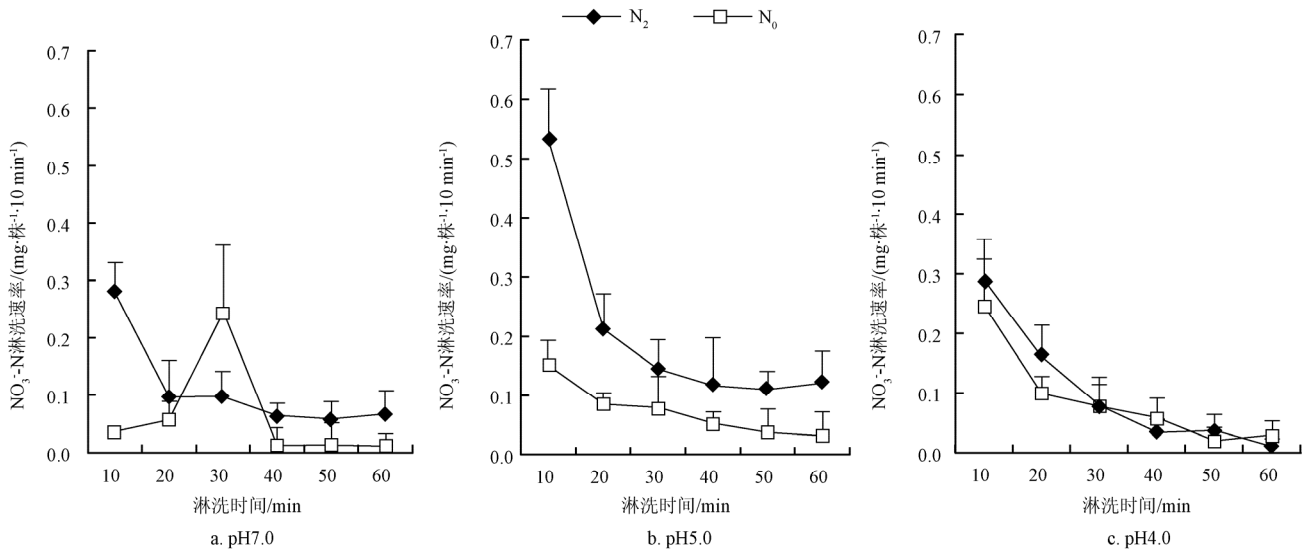


图 4 介质施氮与降雨 pH 值对灌浆期玉米冠层 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 淋失速率的影响

Fig.4 Effects of rainfall pH and N application on NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N leaching loss from maize canopy during grain-filling period

表 1 不同 pH 值降雨玉米冠层 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 1 h 淋失量

Table 1 Amount of NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N leaching loss from maize canopy during 1 h rainfall (mg 株<sup>-1</sup>)

pH 值	11 叶期			吐丝期			灌浆期		
	7.0	5.0	4.0	7.0	5.0	4.0	7.0	5.0	4.0
N <sub>2</sub>	15.378	8.847	4.020	1.570	2.264	1.890	0.663	1.237	0.605
N <sub>0</sub>	1.368	7.403	15.213	0.820	0.904	0.587	0.373	0.530	0.520

除 11 叶期 pH4.0 降雨外，各生育期不同 pH 值降雨条件下，施氮处理玉米冠层 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 淋失量均高于不施氮处理（表 1），介质施氮对玉米冠层 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 淋失影响显著。

综上所述，玉米冠层 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 淋失受介质施氮和降雨 pH 值共同影响，二者在不同生育期其贡献大小有所不同，但总体来看，介质施氮仍是影响玉米冠层 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 淋失的主要因素。

### 2.3 冠层 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 1 h 淋失量随生育期的变化

pH7.0 模拟降雨条件下（表 1），施氮与不施氮对照处理，冠层 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 1 h 淋失量随生育期推进均呈降低趋势：11 叶期>吐丝期>灌浆期，pH5.0 和 pH4.0 降雨结果与 pH7.0 相似，生育前期（11 叶期）冠层 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 淋失量显著高于生育中、后期（吐丝期、灌浆期）。

### 2.4 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 淋失量与冠层氮素含量相关关系

相关分析表明（表 2），pH7.0 模拟降雨时，各生育期玉米冠层 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 1 h 淋失量与叶片和茎鞘（茎秆+叶鞘）氮素含量均呈高度正相关。pH5.0 模拟降雨时，吐丝期、灌浆期冠层 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 淋失量与冠层氮素含量呈高度正相关，但 11 叶期冠层 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 淋失量与氮素含量无显著相关性。pH4.0 模拟降雨条件下，11 叶期冠层 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 淋失量与冠层氮素含量显著负相关，吐丝期二者又呈高度正相关，灌浆期两者相关性不显著。总体看，中性降雨冠层 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 淋失量与冠层氮素含量关系最为密切，随降雨酸度增加，二者关系比较复杂，这可能与植物体细胞

膜透性、自身代谢等对降雨酸度增加的反应有关，还需进一步研究。

表 2 玉米冠层 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 1 h 淋失量与冠层氮素含量相关关系

Table 2 Correlation between the amount of NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N leaching loss and canopy nitrogen content

	pH7.0 降雨 NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -N 淋失量			pH5.0 降雨 NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -N 淋失量			pH4.0 降雨 NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -N 淋失量		
	11 叶期	吐丝期	灌浆期	11 叶期	吐丝期	灌浆期	11 叶期	吐丝期	灌浆期
叶片全氮含量	1.00**	0.99**	0.92**	0.36	0.95**	0.96**	-0.87**	0.93**	0.37
茎鞘全氮含量	0.98**	0.95**	0.91**	0.40	0.90**	0.97**	-0.88**	0.91**	0.40

注：“\*\*”表示高度相关。

## 3 讨论

影响冠层氮素淋失的因素很多，降雨对冠层氮素淋溶程度因介质施氮、降雨 pH 值、雨水成分、植株抗淋洗特性（叶片保护组织）以及植株逆境反应机理等不同而异。一般情况下淋失养分主要来自于叶片，Swank 与 Reynolds 通过对白松长期观测指出，从叶片淋失的 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 占冠层淋失总量的 90% 以上<sup>[15]</sup>。包括细胞间隙在内占生物体 5%~20% 的质外体中存在大量矿质态氮和小分子有机氮，被认为是氮素淋失的主要来源，淋失主要发生在细胞间隙养分浓度和溶解性高的生长期（特别是叶片快速生长期）<sup>[1,9]</sup>。

### 3.1 介质施氮对玉米冠层 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 淋失的影响

介质施氮是影响玉米冠层氮素含量的主要因素之一，各生育期玉米冠层全氮含量随介质施氮均显著增加（表 3），介质施氮通过影响玉米冠层氮素含量从而对冠层 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 淋失产生影响。11 叶期中性降雨淋洗时，施氮后冠层 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 淋失量明显增加（图 2a），显然与施氮处理植株体内氮素相对丰富有关；降雨 pH 值较低时，施氮处理冠层 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 淋失量反而显著低于不施氮处理（图

2c), 可能是不施氮处理在强酸雨条件下, 细胞膜受损, 透性增大<sup>[16-18]</sup>, 因而  $\text{NO}_3^-$ -N 被大量淋溶, 但确切原因尚待进一步研究。吐丝期和灌浆期, 各 pH 值降雨条件下, 施氮后玉米冠层  $\text{NO}_3^-$ -N 淋失量均显著增加(图 3, 图 4), 玉米冠层氮素含量应是影响  $\text{NO}_3^-$ -N 淋失的主要因素。综上所述, 生育前期(11 叶期)玉米冠层  $\text{NO}_3^-$ -N 淋失量不仅与植株体内氮素含量有关, 同时还受降雨 pH 值影响, 生育中、后期(吐丝期、灌浆期)玉米冠层氮素含量对  $\text{NO}_3^-$ -N 淋溶影响相对较大, 而降雨 pH 值影响相对减弱。造成生育前、后期这种差异的原因, 可能与生育前期玉米生长旺盛, 叶片娇嫩, 细胞膜易受伤害, 对酸雨反应强烈, 而生育后期叶片生理活性下降, 对酸雨反应相对减弱有关。

表 3 施氮与不施氮处理冠层氮素含量

Table 3 Canopy nitrogen content of different N application treatments (mg·株<sup>-1</sup>)

	冠层全氮含量		
	11 叶期	吐丝期	灌浆期
N <sub>2</sub>	609.23	765.55	657.15
N <sub>0</sub>	159.77	237.06	140.08

### 3.2 降雨 pH 值对玉米冠层 $\text{NO}_3^-$ -N 淋失的影响

各生育期玉米冠层  $\text{NO}_3^-$ -N 淋失量随降雨酸度变化规律不一(表 1)。11 叶期, 施氮处理玉米冠层  $\text{NO}_3^-$ -N 淋失量随降雨 pH 值降低而降低, 不施氮处理冠层  $\text{NO}_3^-$ -N 淋失量随降雨 pH 值降低而增加。这种差异可能与施氮处理叶片尤其是质外体中氮素含量丰富, 在中性降雨条件下大量淋失, 而在降雨酸度增加时, 植株体内产生一定应激效应<sup>[16]</sup>, 保护叶片及质外体中氮素不致大量外泄有关; 而不施氮的弱势植株, 遇到强酸雨逆境, 其自身抗氧化酶等防御体系应激效应较差, 细胞膜遭受严重破坏, 透性增大, 更多  $\text{NO}_3^-$ -N 进入质外体并被大量淋失。吐丝期和灌浆期, 无论施氮与否, 玉米冠层  $\text{NO}_3^-$ -N 淋失量均随降雨 pH 值降低先增加后降低, pH5.0 模拟降雨条件下冠层  $\text{NO}_3^-$ -N 淋失量最大, pH4.0 降雨冠层  $\text{NO}_3^-$ -N 淋失量反而较 pH5.0 有所降低。已有研究指出, 叶片出现明显受伤症状的临界点多为 pH3.5<sup>[18-19]</sup>, 本试验 pH4.0 酸雨接近作物最大耐受限度, 作物受到明显伤害之前, 叶片膜保护酶活性等会出现一系列应激效应而增强自身保护, 以降低逆境对其伤害程度<sup>[16]</sup>, 因此, 导致 pH4.0 降雨条件下冠层  $\text{NO}_3^-$ -N 淋失量反而较 pH5.0 降雨时低。

造成相同处理生育前、后期  $\text{NO}_3^-$ -N 淋失量随降雨酸度变化规律差异的原因可能仍与 11 叶期叶片娇嫩, 对降雨尤其是酸雨比较敏感, 而生育后期叶片生理活性下降, 对酸雨反应相对减弱有关。

降雨 pH 值对不同生育期玉米冠层  $\text{NO}_3^-$ -N 淋失影响程度不同(表 1), 生育前期(11 叶期)降雨 pH 值对玉米冠层  $\text{NO}_3^-$ -N 淋失影响显著, 生育中、后期(吐丝期和灌浆期)玉米冠层  $\text{NO}_3^-$ -N 淋失量受降雨 pH 值影响相对较小。

### 3.3 玉米冠层 $\text{NO}_3^-$ -N 淋失量随生育期的变化

无论施氮与否, 相同 pH 值模拟降雨条件下, 玉米冠层  $\text{NO}_3^-$ -N 1 h 淋失量随生育期逐渐降低(表 1): 11 叶期>吐丝期>灌浆期, 生育前期(11 叶期)显著高于生育中、后期(吐丝期和灌浆期)。施氮与不施氮处理, 11 叶期玉米冠层全氮含量均较吐丝期少(表 3), 其冠层  $\text{NO}_3^-$ -N 淋失量却显著高于吐丝期, 这可能与冠层淋洗养分主要来自叶片<sup>[9,15]</sup>, 而 11 叶期玉米叶片正处于快速生长期有关, 具体原因有待进一步研究。

各生育期玉米冠层均存在一定数量的  $\text{NO}_3^-$ -N 淋失, 尤以生育前期为甚, 这一结果说明在研究农田生态系统氮素流量和冠层氮素损失时, 冠层氮素淋失应予以考虑, 而目前在农田生态系统氮素流量和冠层氮素损失评价中几乎均未包括这一部分。

## 4 结 论

1) 11 叶期玉米冠层  $\text{NO}_3^-$ -N 淋失速率随淋洗时间变化规律不一, 吐丝期和灌浆期  $\text{NO}_3^-$ -N 淋失速率随淋洗时间均呈降低趋势。介质施氮是影响冠层氮素淋失的主要因素之一, 但不是唯一影响因素, 且介质施氮对冠层氮素淋失的影响程度与降雨 pH 值有关。中性及弱酸性降雨淋洗, 介质施氮对冠层  $\text{NO}_3^-$ -N 淋失影响相对较大, 施氮可显著增加玉米冠层  $\text{NO}_3^-$ -N 淋失量; 而在强酸雨淋洗时, 玉米冠层  $\text{NO}_3^-$ -N 淋失量受介质施氮和降雨 pH 值共同影响。

2) 中性及弱酸性降雨淋洗, 降雨 pH 值对冠层氮素淋失量的影响相对较小, 而强酸性降雨, 降雨 pH 值的影响相对较大。此外, 降雨 pH 值对玉米冠层  $\text{NO}_3^-$ -N 淋失量的影响与生育期有关, 生育前期(11 叶期)降雨 pH 值对玉米冠层  $\text{NO}_3^-$ -N 淋失量影响显著, 生育中、后期(吐丝期和灌浆期)影响相对较小。

3) 相同 pH 值模拟降雨条件下, 玉米冠层  $\text{NO}_3^-$ -N 淋失量随生育期逐渐降低: 11 叶期>吐丝期>灌浆期, 生育前期显著高于生育中、后期。生育前期玉米冠层  $\text{NO}_3^-$ -N 淋失量同时受冠层氮素含量和降雨 pH 值影响, 生育后期玉米冠层氮素含量对  $\text{NO}_3^-$ -N 淋失的影响相对更大。各生育期玉米冠层均存在一定量的  $\text{NO}_3^-$ -N 淋失, 尤以生育前期为甚, 在研究农田生态系统氮素流量和冠层氮素损失时, 冠层氮素淋失应予以考虑。

### [参 考 文 献]

- [1] Tukey H B J. The leaching of substances from plants[J]. Annual Review of Plant Physiology, 1970, 21(6): 305—324.
- [2] Tukey H B J. Leaching of metabolites from above-ground plant parts and its implications[J]. Bulletin of the torrey botanical club. 1966, 93(6): 385—401.
- [3] Foster J R. Influence of pH and plant nutrient status on ion fluxes between tomato plants and simulated acid mists[J]. New Phytology, 1990, 116(3): 475—485.
- [4] Lin T C, Hamburg S P, Hsia Y J, et al. Base cation leaching from the canopy of a subtropical rainforest in northeastern

- Taiwan[J]. *Canadian Journal of Forest Research*, 2001, 31(7): 1156—1163.
- [5] Sayer R G, Fahey T J. Effects of rainfall acidity and ozone on foliar leaching in red spruce (*Picea rubens*)[J]. *Canadian Journal of Forest Research*, 1999, 29(4): 487—496.
- [6] 夏阳, 林杉, 张福锁, 等. 盐胁迫对玉米冠层淋洗物中氮组分的影响[J]. *作物学报*, 2002, 28(2): 278—281.  
Xia Yang, Lin Shan, Zhang Fusuo, et al. Effect of NaCl stress on N-components in leachates from Maize canopy[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2002, 28(2): 278—281. (in Chinese with English abstract)
- [7] Prescott C E. The influence of the forest canopy on nutrient cycling [J]. *Tree Physiology*, 2002, 22(15/16): 1193—1200.
- [8] Currie W S, Aber J D, Driscoll C T. Leaching of nutrient cations from the forest floor: effects of nitrogen saturation in two long-term manipulations[J]. *Canadian Journal of Forest Research*, 1999, 29(5): 609—620.
- [9] 李世清, 吉春容, 范亚宁, 等. 植物冠层氮素淋失研究进展[J]. *中国农业科学*, 2007, 40(12): 2774—2779.  
Li Shiqing, Ji Chunrong, Fan Yaning, et al. Advances in nitrogen loss leached by precipitation from plant canopy[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2007, 40(12): 2774—2779. (in Chinese with English abstract)
- [10] Turner D P, Tingey D T. Foliar leaching and root uptake of Ca, Mg and K in relation to acid fog effects on Douglas-Fir [J]. *Water, Air, and Soil Pollution*, 1990, 49(1/2): 205—214.
- [11] 田大伦, 杨晚华, 方海波. 第二代杉木幼林中降雨对养分的淋溶作用[J]. *湖北民族学院学报: 自然科学版*, 1999, 17(1): 1—5.  
Tian Dalun, Yang Wanhua, Fang Haibo. A study on nutrient leaching in the secondary generation young Chinese fir plantation[J]. *Journal of Hubei Institute for Nationalities*, 1999, 17(1): 1—5. (in Chinese with English abstract)
- [12] Duchesne L, Ouimet R, Camiré C, et al. Seasonal nutrient transfers by foliar resorption, leaching, and litter fall in a northern hardwood forest at Lake Clair Watershed, Quebec, Canada[J]. *Canadian Journal of Forest Research*, 2001, 31(2): 333—344.
- [13] 李裕元, 邵明安, 郑纪勇, 等. 降雨强度对黄绵土坡地磷流失特征影响试验研究[J]. *农业工程学报*, 2007, 23(4): 39—46.  
Li Yuyuan, Shao Ming'an, Zheng Jiyong, et al. Experimental study on the impacts of rainfall intensity on phosphorus loss from loessial slope land[J]. *Transactions of the CSAE*, 2007, 23(4): 39—46. (in Chinese with English abstract)
- [14] 张兴昌. 耕作及轮作对土壤氮素径流流失的影响[J]. *农业工程学报*, 2002, 18(1): 70—73.  
Zhang Xingchang. Soil nitrogen loss in runoff and sediment as affected by level trench and crop rotation[J]. *Transactions of the CSAE*, 2002, 18(1): 70—73. (in Chinese with English abstract)
- [15] Swank W T, Reynolds L J. Analysis of dry and wet deposition, throughfall, and stemflow event chemistry in a *Pinus strobus* L. plantation[J]. *Proceedings of International Symposium on Acidification and Water Pathways*, 1987, 2(2): 127—136.
- [16] 齐泽民, 钟章成, 杨万勤. 模拟酸雨对杜仲抗性生理及药用有效成分含量的影响[J]. *应用与环境生物学报*, 2006, 12(2): 190—194.  
Qi Zemin, Zhong Zhangcheng, Yang Wanqin. Effects of simulated acid rain on resistance physiology and medicinal components of *Eucommia ulmoides* Oliv[J]. *Chinese Journal of Applied and Environmental Biology*, 2006, 12(2): 190—194. (in Chinese with English abstract)
- [17] 严重玲, 洪业汤, 林鹏, 等. 菠菜对酸雨胁迫的响应及稀土元素的作用[J]. *园艺学报*, 1999, 26(1): 54—56.  
Yan Chongling, Hong Yetang, Lin Peng, et al. Response of spinach to acid rain and conservation of rare earth elements to the plant[J]. *Acta Horticulturae Sinica*, 1999, 26(1): 54—56. (in Chinese with English abstract)
- [18] Hogan G D. Effect of simulated acid rain on physiology, growth and foliar nutrient concentrations of sugar maple[J]. *Chemosphere*, 1998, 36(4/5): 633—638.
- [19] 冯宗炜. 中国酸雨对陆地生态系统的影响和防治对策[J]. *中国工程科学*, 2000, 2(9): 5—11.  
Feng Zongwei. Impacts and control strategies of acid deposition on terrestrial ecosystems in China[J]. *Engineering Science*, 2000, 2(9): 5—11. (in Chinese with English abstract)

## Effects of N application and simulated rainfall pH value on NO<sub>3</sub>-N leaching loss from canopy of maize

Wang Limei<sup>1,3</sup>, Li Shiqing<sup>1,2\*</sup>, Shao Ming'an<sup>2</sup>

(1. State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on Loess Plateau, Northwest Agriculture and Forestry University, Yangling 712100, China; 2. Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences, Yangling 712100, China; 3. College of Resources and Environment, Northwest Agriculture and Forestry University, Yangling 712100, China)

**Abstract:** In order to find out the effect of acid rain on corn canopy, a simulated rainfall experiment was conducted to investigate the influence of N application and rainfall pH on nitrate leaching loss from the potted maize canopy as well

as its changes over the growing season. The results showed that the amount of nitrate ( $\text{NO}_3^-$ -N) leaching from maize canopy was mainly influenced by canopy N content which closely related with N application when rainfall pH was above 5.0. N application significantly increased the amount of canopy  $\text{NO}_3^-$ -N leaching loss, nevertheless, when rainfall pH was 4.0, both rainfall pH and canopy N content had significant influence on  $\text{NO}_3^-$ -N leaching loss. The change characteristics of  $\text{NO}_3^-$ -N leaching loss with decreasing rainfall pH varied at different growth stages, rainfall pH had more significant influence on  $\text{NO}_3^-$ -N leaching in early growth stage than in later growth stage. Under the same pH rainfall condition, the amount of canopy  $\text{NO}_3^-$ -N leaching loss decreased with maize growing: 11-leaf period > spinning period > grain-filling period, and the amount of leaching loss in early growth stage was obviously higher than in later stage. In conclusion, both canopy N content and rainfall pH could influence  $\text{NO}_3^-$ -N leaching loss, but the canopy N content was the comparatively main factor, the maize canopy  $\text{NO}_3^-$ -N could be significantly leached by simulated rainfall, especially in early growth stage, thus the amount of  $\text{NO}_3^-$ -N leaching from canopy should be taken into account in study of canopy N cycle, flux and losses.

**Key words:** nitrogen, rain, pH, maize,  $\text{NO}_3^-$ -N leaching loss from canopy