

· 综述 ·

# 农田土壤氮素渗漏淋失研究进展

王吉苹<sup>1,2</sup>, 朱木兰<sup>1</sup>, 李青松<sup>1</sup>

(1. 厦门理工学院环境科学与工程学院, 福建 厦门 361024; 2. 厦门大学环境与生态学院, 福建 厦门 361005)

**摘要:** 对农田土壤氮素淋失的相关研究进行综述和总结是研究农业面源氮素污染的一个至关重要的前提。本文从土壤氮素渗漏淋失形态和迁移机理、氮素渗漏淋失的研究方法和影响土壤氮素渗漏淋失的因素三方面进行了详细的分析介绍, 概述了近年来国内外农田氮素渗漏淋失的研究进展和研究成果, 并在此基础上展望了未来氮素淋失研究工作的重点。研究结论对农田土壤的水肥管理措施及浅层地下水硝氮污染的减缓有一定的理论和借鉴意义

**关键词:** 氮素; 渗漏淋失;  $\text{NO}_3^-$ -N; 施肥; 灌溉

中图分类号: X53

文献标识码: A

文章编号: 1001-3644(2014)06-0118-08

DOI:10.14034/j.cnki.schj.2014.06.023

## Research Progress of Nitrogen Leaching in Farmland Soil

WANG Ji-ping<sup>1,2</sup>, ZHU Mu-lan<sup>1</sup>, LI Qing-song<sup>1</sup>

(1. College of Environmental Science & Engineering, Xiamen University of Technology, Xiamen, Fujian 361024, China;

2. College of the Environment & Ecology, Xiamen University, Xiamen, Fujian 361005, China)

**Abstract:** Reviewing and summarizing the related research of farmland soil nitrogen leaching loss is a crucial basis of studying agricultural non-point source of nitrogen pollution. This paper introduced and analyzed the leaching form and migration mechanism of soil nitrogen, research methods and influencing factors of nitrogen leaching in farmland soil. The recent research progress of nitrogen leaching in farmland soil at home and abroad was summarized, and the future research priorities were pointed out. The research conclusions have some reference values on farmland soil fertilization management measures and slowing down the nitrate nitrogen pollution in shallow groundwater.

**Keywords:** Nitrogen; leaching;  $\text{NO}_3^-$ -N; fertilization; irrigation

氮是水体中富营养化的关键因子, 也是植物生长必不可少的营养元素。近年来, 土地利用方式的急剧变化以及农田过量施用化肥等农业活动导致了流域大量氮素流失<sup>[1-3]</sup>。调查表明, 施于土壤的总氮 (Total nitrogen, TN) 中, 约30%~70%被作物截取, 其余则从地表径流、氨挥发、反硝化等各种途径损失<sup>[4]</sup>。渗漏淋失是土壤中氮素损失的重要方面之一, 据研究渗漏淋失量可达5%~41.9%<sup>[5]</sup>。它不仅制约氮肥的利用效率, 还可能导致地下水污染, 威胁人类健康, 导致不良环境和

经济后果, 制约着农业的可持续发展。

## 1 土壤氮素渗漏淋失机理

土壤中本身的氮素以及人为施入肥料中的氮素, 伴随着降雨和灌溉, 一部分直接以尿素等化合物形式, 另外大部分以可溶性的  $\text{NO}_3^-$ 、 $\text{NO}_2^-$  和  $\text{NH}_4^+$  形式最终淋溶到土壤下层。该迁移过程伴随着不同形态氮素相应的化学转化下图, 如矿化 (有机质 $\rightarrow\text{NH}_4^+$ ), 氨挥发 ( $\text{NH}_4^+ + \text{OH}^- \rightarrow \text{NH}_3$ ), 硝化 ( $\text{NH}_4^+ \rightarrow \text{NO}_3^-$ ), 反硝化 ( $\text{NO}_3^- \rightarrow \text{NO}_2^- \rightarrow \text{N}_2\text{O} \rightarrow \text{N}_2$ ), 水解 (尿素:  $(\text{NH}_2)_2\text{CO} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CO}_2 + \text{NH}_3 \rightarrow \text{NH}_4^+$ ), 土壤固定 ( $\text{NH}_4^+ \rightarrow$ 有机质) 以及作物吸收<sup>[6]</sup>。因此农田土壤氮素迁移主要化合物形态为  $\text{NO}_3^-$ 、 $\text{NO}_2^-$  和  $\text{NH}_4^+$ 。 $\text{NO}_2^-$  不稳定, 容

收稿日期: 2013-10-26

基金项目: 福建省自然科学基金(2013J01211, 2013J01210); 国家自然科学基金项目(51378446)。

作者简介: 王吉苹(1980-), 女, 山东济南人, 厦门大学环境管理专业2010级在读博士研究生, 讲师, 研究方向为区域资源与环境管理、污染控制、营养盐迁移转化等。

易被氧化为  $\text{NO}_3^-$ , 带正电荷的  $\text{NH}_4^+$  一般情况下易被带负电荷的土壤胶体所吸附, 较少沿土壤剖面垂直向下移动或从土壤中渗漏淋失, 基本滞留在土壤剖面上、中层, 而带负电荷的  $\text{NO}_3^-$  不易被土壤胶体所吸附, 可以随水分自由移动, 极易淋洗到下层并污染浅层地下水<sup>[7]</sup>。因此, 硝氮 ( $\text{NO}_3\text{-N}$ ) 是土壤氮素转化、迁移过程中最常见和最活跃的氮素形态, 土壤渗漏淋失的  $\text{NO}_3\text{-N}$  是浅层地下水中硝酸盐氮污染的主要来源。

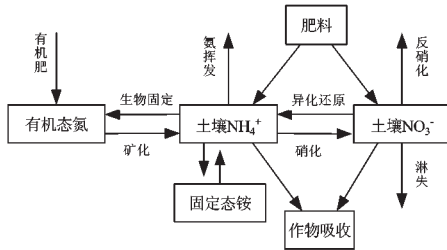


图 土壤氮素循环过程  
Fig. The soil nitrogen cycle

## 2 氮素渗漏淋失的方法研究

测定氮素田间渗漏淋失量的方法主要包括间接计算法和直接测定法。前者基于氮循环的质量平衡计算, 后者基于排水采集器和多孔杯测定渗漏水样数量以及其中氮素的浓度, 结合长期试验, 可以揭示土壤氮素渗漏淋失的过程及其影响因子。

### 2.1 质量平衡法

属于研究土壤氮素渗漏淋失的普便方法。以大气-土壤-植被为系统, 通过定量测定土壤氮素的各项输入、输出如降雨、灌溉、施肥的氮输入、地表径流、侧向流、地下径流的氮输出, 通过差减法来间接计算统计土壤中氮素的渗漏淋失量。各相关氮素输入输出的测定较繁琐, 且决定了计算结果的精确度与准确度<sup>[8,9]</sup>。

### 2.2 渗漏计测定法 (Lysimeter)

该方法通过在野外安装渗漏装置直接测定土壤的氮素淋失浓度和渗漏水量, 是研究土壤氮素渗漏淋失最直接和经济有效的手段<sup>[10,11]</sup>, 常用的如原装土柱采样器和平板式 (盘式) 采样器。氮素渗漏淋失总量等于渗漏水浓度 (C) 与渗水量 (V) 的乘积或 C-V 曲线的面积。其优点是能直接定量测定 C、V 值, 缺点是安装和监测费时费力, 对土壤的破坏较大, 取样采样较困难<sup>[9,12]</sup>。

### 2.3 土壤溶液提取器测定法 (Suction Cup)

土壤溶液提取器, 又称为多孔陶土杯, 因其方

便小巧, 对土壤扰动小, 应用比较广泛<sup>[13]</sup>。主要原理是通过陶土杯获得土壤溶液的氮素浓度 (C), 结合土壤水分平衡法、达西定律等计算渗水量 (V)<sup>[14]</sup>。但因其截面积较小可能不能反映土壤及溶液的空间变异性且通过该方法只能直接测定得到渗漏水样的氮的浓度, 渗漏水量的获得是通过间接获取的<sup>[12]</sup>。

### 2.4 多孔 PVC 管测定法

将下部桶壁钻小孔的 PVC 管 (直径 10cm 左右), 埋入土壤根际区以下, 每隔一定时间采集渗漏水样, 测定其浓度<sup>[15-17]</sup>。该方法只能测得浓度, 无法得出土壤水的渗水量。

### 2.5 离子交换树脂包 SRC 测定法 (Soil-Resin-Core)

在原状土柱下放置阴离子交换树脂包, 用来吸附土壤淋失的  $\text{NO}_3^-$ , 洗脱后可测出原态条件下土壤氮素的状况<sup>[18]</sup>。缺点是离子交换树脂的洗脱率难以达到 100%, 且该方法也只能测得浓度, 无法得出土壤水的渗水量。

## 3 影响土壤氮素渗漏淋失的因素

土壤中的氮素发生渗漏淋失须满足两个基本条件: (1) 土壤中积累的容易迁移的氮含量高 ( $\text{NO}_3\text{-N}$  为主要形态)。该条件既受土壤中氮的输入和输出的控制, 又受土壤中物理、化学和生物过程的控制。(2) 土壤中的水分充足, 存在运移现象<sup>[19]</sup>。换句话说, 氮的渗漏淋失发生的前提条件是土壤中氮素尤其是  $\text{NO}_3\text{-N}$  含量较高和水分运移良好, 增进或阻滞这两个条件之一发生的任何因素都会影响氮的淋失。

### 3.1 肥料的施用

氮肥施用量是影响氮素淋失的最重要因素之一<sup>[10,20,21]</sup>。研究表明氮的淋失量与施氮量呈显著的正比例线性关系<sup>[22-26]</sup>。此外, 氮素的淋失还受肥料品种、施肥时间、施肥方式等的影响 (表 1)。我国南方地区水稻田因为早晚两季水稻的种植, 需要施两次基肥, 因此  $\text{NO}_3\text{-N}$  渗漏淋失量出现典型的双峰曲线消长<sup>[7]</sup>。氮肥种类的不同影响氮素在土壤中的迁移程度, 施用以  $\text{NO}_3\text{-N}$  为主的氮肥, 氮素淋溶的潜在性更大。国内有学者研究发现, 在施氮量相同的情况下, 施硝铵的土壤氮素淋失量要比施尿素和硫酸铵的高<sup>[27]</sup>。过量施用有机粪肥也会导致氮素尤其是  $\text{NO}_3\text{-N}$  的渗漏淋失<sup>[28]</sup>。有机形态

的氮约占 TN 量的 90% 以上, 在一定的环境条件下, 有机氮含量相对稳定, 但随着有机肥的大量施用, 土壤有机质含量增加, 其分解能力和矿化作用也随之增强, 尤其是在氮素释放的最大时期与植物对氮素的最强吸收时间不一致, 释放出的  $\text{NO}_3\text{-N}$  难于被植物全部吸收利用, 会造成土壤溶液中氮素的累积和淋失<sup>[19]</sup>。Basso 和 Ritchie 对密歇根州玉米-苜蓿轮作体系分别施用无机氮肥、动物粪肥以

及不施肥状态下作物的产量和氮的渗漏淋失状况进行了比较<sup>[29]</sup>。结果发现最高  $\text{NO}_3\text{-N}$  渗漏淋失量和  $\text{NO}_3\text{-N}$  淋失率均发生在施用动物粪肥的玉米轮作体系和苜蓿玉米轮作体系; 然后依次为施用复合肥、无机氮肥和不施肥的轮作体系。有研究表明有机肥与化肥配施会减少单施一种肥料淋失的潜在风险<sup>[30]</sup>。

表 1 施肥对氮素淋失的影响

Tab. 1 Effects of fertilization on nitrogen leaching

( $\text{kg N / hm}^2$ )

来源	地点	土地利用	施肥量	氮素淋失
Bakhsh , et al. ,2000 <sup>[34]</sup>	美国, Iowa	玉米	尿素, 135	17
		玉米	液态猪粪, 160	26
		玉米-大豆轮作	尿素, 110	14
		玉米-大豆轮作	液态猪粪, 136	20
		大豆-玉米轮作	尿素, 110	13
		大豆-玉米轮作	液态猪粪, 136	20
		de Paz and Ramos ,2004 <sup>[35]</sup>	西班牙, Valencia	蔬菜
柑橘	372 (基准值)			210 (基准值)
蔬菜	396			227, 减少 23%
柑橘	297			155, 减少 26%
蔬菜	248			138, 减少 53%
柑橘	186			74, 减少 65%
蔬菜	211			99, 减少 66%
柑橘	112			43, 减少 80%
Diez - Lopez , et al ,2008 <sup>[36]</sup>	西班牙, Madrid	玉米	0 ~ 260	6.70 ~ 76.40
Aronsson and Stenberg ,2010 <sup>[37]</sup>	瑞典, Lanna	小麦	180	6.5 ~ 6.60
Bakhsh , et al ,2010 <sup>[38]</sup>	美国, Iowa	玉米	168	11.30 ~ 11.50
			370	63.3
			1110	227.1
Zhao , et al ,2010 <sup>[39]</sup>	中国, 武汉	蔬菜	1480	353.7
Sorensen and Rubaek ,2012 <sup>[40]</sup>	丹麦, Foulum	小麦	60 ~ 268	48.50 ~ 82.50
Mahboubeh and Mohsen ,2012 <sup>[41]</sup>	伊朗, Hamedan	小麦、土豆	138 ~ 230	14.00 ~ 98.68

Gärdenäs 通过田间实验证实氮素的渗漏淋失不仅和施肥量及施肥种类有关系还和施肥方式有关, 并发现灌溉后施肥比灌溉前施肥可减少相应的  $\text{NO}_3\text{-N}$  淋失量<sup>[31]</sup>。Siyal 等研究表明将氮肥施在垄沟地的近垄的旁边, 或施在垄中间都可提高氮肥的最大利用效率, 减少渗漏损失<sup>[32]</sup>。Fangueiro 研究还表明肥料酸化将加重土壤氮素的渗漏淋失<sup>[33]</sup>。

### 3.2 降雨量和灌溉

土壤中的水分含量达到饱和时, 氮才会随水分向下迁移。降雨量越大, 农田土壤硝态氮的淋溶损

失量也会越大。因而, 通常情况下, 氮素淋失主要发生在雨季。很多研究也表明降雨是氮淋失的主要决定因素之一<sup>[42, 43]</sup>。曹巧红和龚元石研究了降水对冬小麦农田水分渗漏和氮素淋失的影响 (土壤类型为粉砂质壤土), 结果表明降水量愈大, 渗漏水量愈大, 氮素淋失量也会越大, 其中渗漏水量约占降雨量的 10% ~ 40% 左右, 水分渗漏及氮素淋失主要发生在冬小麦返青期和拔节期灌溉后<sup>[44]</sup>。另有研究表明氮素淋失受季节的影响, 且随着温度的升高与降雨量的增加而增加<sup>[45]</sup>。

灌溉也是影响  $\text{NO}_3\text{-N}$  淋失的重要因素之一, 其影响机制与降雨类似, 灌溉强度、灌溉时间对硝态氮的迁移和下渗都有重要影响。在灌溉后自然排水明显导致土壤中氮的淋失前提下, 氮的淋失量与灌溉水量呈显著正相关<sup>[42, 46]</sup>, 并且小水量多次灌溉方式比大水量少次灌溉会明显减少氮素的渗漏淋失<sup>[47, 48]</sup> (表 2)。对于具有较高下渗率的粗质土壤来说, 在灌溉前将垄沟地的沟部压实或者在底部放置塑料薄膜均可提高灌溉效率<sup>[32]</sup>。

叶优良等在甘肃省河西走廊灌区 (土壤类型为石灰性灌漠土) 大麦/玉米轮作条件下研究了灌溉对氮素淋失的影响。灌溉水量明显影响土壤硝态氮的累积量, 随灌水次数增加, 土壤硝态氮累积量降低, 而且在高灌水条件下土壤硝态氮累积量变化比低灌水量时大<sup>[49]</sup>。Peng 等研究表明控制灌溉和排水可同时减少水稻田  $\text{NO}_3\text{-N}$  和  $\text{NH}_4\text{-N}$  的淋失, 相比传统的大水漫灌方式可减少 50.7% ~ 59.2% 和 45.2% ~ 73.2% 的  $\text{NO}_3\text{-N}$  和  $\text{NH}_4\text{-N}$  渗漏损失<sup>[50]</sup>。

表 2 降雨和灌溉对氮素淋失的影响研究

Tab. 2 Effects of rainfall and irrigation on nitrogen leaching

(kg N /hm<sup>2</sup>)

来源	地点	降雨量/灌溉方式	氮素淋失
Diez, et al, 1997 <sup>[51]</sup>	西班牙, Madrid	传统灌溉, 4 种施肥措施	分别为 74、166、132、142
		节水灌溉, 4 种施肥措施	分别为 16.9、43.5、27.7、13.7
	西班牙, Barcelona	滴灌, 根际区负压为 -0.01 MPa (湿)	$\text{NO}_3\text{-N}$ 淋失 1535
		滴灌, 根际区负压为 -0.07 MPa (干)	$\text{NO}_3\text{-N}$ 淋失 471
Ng, et al, 2002 <sup>[52]</sup>	加拿大, Ontario	随意排水和灌溉	57.9
		地下灌溉, 有控制排水	36.8
Vázquez, et al, 2006 <sup>[48]</sup>	西班牙, Valdegon	每天不间断浇灌 8h	233
		每天 8 次灌溉, 每次不间断浇灌 15 min	80
Waddell and Weil, 2006 <sup>[43]</sup>	美国, 明尼苏达州	灌溉量 365 mm	114.7
		灌溉量 538 mm	162.3
Peng, et al, 2014 <sup>[50]</sup>	山东, 苏州	大水漫灌 915.9mm	1.61
		节水灌溉 648.3mm	0.88
		节水灌溉 548.4mm	0.43
Jia, et al, 2014 <sup>[53]</sup>	中国, 泰安	尿素 200 kg N /hm <sup>2</sup> , 灌溉量 525 mm	玉米品种 1: 77.22 玉米品种 2: 47.86

### 3.3 土壤类型

不同的土壤类型往往具有不同的物理性质, 如机械组成、孔隙度、田间持水量、凋萎系数等。这些物理特性均会影响水分在土壤剖面中的迁移和下渗<sup>[54, 55]</sup>。例如, 砂性土壤因其孔隙较大, 较之粘性土壤的氮素淋失量大<sup>[28, 44]</sup>。Correa 等的研究也证明了沙土比粘土的  $\text{NO}_3\text{-N}$  淋失潜力稍高<sup>[56]</sup>。Beaudoin 等监测了 1991 ~ 1999 年法国北部地区不同土壤的  $\text{NO}_3\text{-N}$  淋失浓度, 相应土壤类型分别为渗水能力依次降底的沙土、沙壤土、壤土、粘壤土、石灰土, 结果为从轻质沙土到重质壤土, 淋失浓度依次减小, 其变化范围为 31 ~ 92 mg/L, 有力地说明了土壤的持水能力对氮素淋失的影响<sup>[57]</sup>。

在一些细质土壤中, 由于大孔隙的存在, 会产生优先流 (preferential flow), 氮素的淋失也很明显<sup>[58]</sup>。Aronsson 和 Bergström 在 1997 - 1999 年对瑞

典的 Uppsala 地区的粘土和沙土两种土壤类型的渗漏淋失情况进行了研究, 由于优先流的影响, 粘土比沙土渗漏淋失更严重<sup>[10]</sup>。

### 3.4 耕作方式

耕作方式影响土壤的扰动程度和残留物的存在, 进一步影响土壤水分运动<sup>[9]</sup>。耕作对作物根系造成的损伤减少了作物对氮的吸收, 同时, 由于根系的破碎和腐烂, 可提供可供矿化的新鲜有机质, 促进了土壤氮素的矿化过程, 增加土壤中硝态氮的累积<sup>[59]</sup>。Ritter 等在灌溉玉米地也有类似发现, 免耕地  $\text{NO}_3\text{-N}$  淋失量为 55.0 ~ 78.8 kg N/hm<sup>2</sup>a<sup>-1</sup>, 而传统耕作的淋失量为 57.1 ~ 94.0 kg N/hm<sup>2</sup> a<sup>-1</sup><sup>[60]</sup>。Perez 等人通过实验表明耕作土壤的  $\text{NO}_3\text{-N}$  淋失量比免耕土壤高 5 倍<sup>[61]</sup>。Waddell 和 Weil 研究也表明旱季免耕的土壤比耕作土壤的氮素吸收能力强<sup>[43]</sup>。然而, 也有研究表明在 0 ~ 40cm 的水稻田

土壤中,免耕地的氨氮( $\text{NH}_4\text{-N}$ )和 $\text{NO}_3\text{-N}$ 淋失大于传统耕作和旋耕,主要是因为耕作降低了田间的饱和导水率,影响了土壤水分运动,使渗漏水量降低,氮素的渗漏淋失量随之降低<sup>[62]</sup>。

垄沟耕作现在也广泛应用于农业生产,该耕作不仅可以影响土壤温度及土壤含水量,同时还影响土壤水分和溶质的迁移。赵允格和邵明安利用人工模拟降雨研究了成垄压实施肥条件下不同的垄坡度及不同压实的障碍层对硝态氮迁移的影响,结果表明对一次60 mm的降雨,无障碍层存在时,平地施肥条件下 $\text{NO}_3\text{-N}$ 渗漏淋失剧烈,垄沟施肥因其将入渗水分区与施肥区分开,从而可以有效降低 $\text{NO}_3\text{-N}$ 的渗漏淋失。相对于不同坡度垄沟, $\text{NO}_3\text{-N}$ 的淋失略有不同<sup>[63]</sup>。

### 3.5 作物种类和种植方式

作物种类、种植方式会影响土壤氮素的渗漏淋失情况。因为不同作物的根系发育与分布不同,导致其对土壤中水分和养分的吸收利用能力不同,从而氮素在土壤中的运移、累积和淋洗受到了很大影响<sup>[9]</sup>。如玉米与小麦根系均较深,而作物如豆类、花生和马铃薯等根系则较浅。根系较深的作物能更有效地吸收利用土壤的氮素,减少氮素的渗漏淋失<sup>[64]</sup>。Beaudoin等对1991~1999年法国北部地区甜菜、花生、大麦等轮作体系的 $\text{NO}_3\text{-N}$ 淋失浓度进行了监测,结果为甜菜-小麦轮作体系最低(38 mg/L),花生-小麦轮作体系最高(66 mg/L)<sup>[57]</sup>。Zhou和Butterbach-Bahl研究表明玉米的 $\text{NO}_3\text{-N}$ 渗漏淋失量是小麦的2倍<sup>[65]</sup>。另有研究表明柳树因其较高的生物量累计和蒸腾速率促使了对 $\text{NO}_3\text{-N}$ 的吸收,减缓了 $\text{NO}_3\text{-N}$ 的渗漏淋失<sup>[10 66]</sup>。

另外,在作物种植前或收获后的季节,种植填闲作物或覆盖作物可以有效吸收土壤中淋失的氮素,从而减少氮渗漏损失<sup>[67]</sup>。例如,在春天3月份播种大麦之前,提前种植雀麦草,可以减少 $\text{NO}_3\text{-N}$ 渗漏淋失2.1~5.6 kg N/hm<sup>2</sup>,而秋天收获后再种植雀麦草,可以减少 $\text{NO}_3\text{-N}$ 渗漏淋失1.4~4.3 kg N/m<sup>2</sup><sup>[68]</sup>。Hansen和Djurhuus(1997)的研究也表明丹麦春天种植黑麦草可减少氮素淋失39 Kg N/hm<sup>2</sup>,秋天种植可减少25 kg N/hm<sup>2</sup><sup>[69]</sup>。Min等研究表明夏季播种蔬菜之前种植填闲作物或覆盖作物可减少50%~73%的氮素渗漏淋失<sup>[70]</sup>。总之,种植填闲作物和覆盖作物不仅能重新吸收利用田间残余的人工施入的氮肥,并可以作为下茬作物的有效氮源,还能够改善土壤结构,提高土壤肥

力,因此,该措施不仅减少了氮肥带来的环境污染,还可以增加农业经济效益。

### 3.6 轮作制度

轮作制度对土壤硝酸盐的淋失也可能产生一定的影响。一般情况下,轮作比连作有利于改善土壤结构、维持土壤养分与水分平衡,进而提高作物对氮素的吸收利用能力,增加土壤的持水能力,因此轮作比连作能减少土壤硝酸盐的淋失<sup>[71 72]</sup>。Craig等研究也表明了大豆与玉米的轮作能显著降低土壤氮素的渗漏淋失<sup>[73]</sup>。

### 3.7 作物残留

收获后的作物秸秆或根茎等残留在土壤里,能为土壤提供一个可矿化氮库,并且可提高土壤的饱和导水率,从而影响氮素的渗漏淋失。有研究表明四季生的苜蓿等植物,因其含氮量高,可以作为地表覆盖物,减少作物对氮肥的需求,从而减少因过量施入氮肥而导致氮素的流失<sup>[74]</sup>。Kavdir等研究了美国密歇根州西南部的壤土覆盖物苜蓿对 $\text{NO}_3\text{-N}$ 淋失的贡献<sup>[75]</sup>,1991年调查显示,美国玉米带上覆盖植物紫花苜蓿每年可产生 $4.3 \times 10^8$  kg的氮;1997年4月到12月,两种处理方式分别为苜蓿收割后,保留苜蓿的根和茎,不保留芽以及根茎芽都还田,前者的 $\text{NO}_3\text{-N}$ 淋失量为83 kg/hm<sup>2</sup>,后者为144kg/hm<sup>2</sup>。Mitchell等研究了英国中部的沙壤土条件下耕作作物残留的影响<sup>[76]</sup>。四种作物收割后处理方式分别为:(1)保留地下的根;(2)地表的茎、叶和地下的根都保留;(3)仅保留地表的茎和叶,地下的根拔除。结果显示残留在地表的茎和叶使后来种植的甜菜和卷心菜1995~1996年的 $\text{NO}_3\text{-N}$ 淋失量增加5~15 Kg N/hm<sup>2</sup>;地下残留根和茎的马铃薯和卷心菜地块1996~1997年 $\text{NO}_3\text{-N}$ 淋失也较大,分别达到69~83和112~115 Kg N/hm<sup>2</sup>。

## 4 研究展望

氮素淋失是以 $\text{NO}_3\text{-N}$ 淋失为主,耦合于作物吸收、矿化、反硝化、氨挥发等土壤转化过程中。对于一定的作物和耕作制度,水肥管理是制约和阻碍农田土壤氮素淋失的最关键和重要环节。因此,可以根据土壤中的矿物组成比例选择合适肥料,平衡施肥;采用节水灌溉如滴灌技术少量多次灌溉,减少氮素的渗漏淋失。进行合理的间作、套作、轮作等措施,提高氮素的利用效率。另外,在作物轮作的间歇期,种植覆盖作物或填闲作物在最大程度

上降低氮在土壤中的累积和渗漏淋失。

通过现在已有的氮素渗漏淋失相应的研究基础上, 我们还可以对以下的几个方面展开深层次的研究:

(1) 大型渗漏计的野外长期监测是一项复杂艰巨的任务, 如何保持土柱的原始形态, 不干扰周围的土壤状态, 渗漏液易收集, 且数量相当并避免生物化学反应是今后亟需解决和完善的课题。因此, 完善渗漏计 (lysimeter) 尤其是原状土柱试验装置在野外监测的设计和安装技术, 加强对土壤水分及氮素的野外同步观测是未来土壤氮素渗漏淋失研究方向的重点。

(2) 不同尺度区域的土壤氮素渗漏淋失特征与形态因地理位置、水文条件、土壤特性等因素的影响, 其渗漏淋失机制有所不同。因此, 对不同地块即田间尺度、小区域尺度、小流域尺度、大流域尺度的氮素渗漏淋失进行逐一分析比较, 探究不同尺度下的氮素渗漏淋失差异是未来农田面源氮污染的前沿领域。

(3) 全球气候变化一直是自然科学研究关注的重点。未来气候变化背景下, 不同农业水肥管理下农田土壤氮素渗漏淋失情况值得进一步深入探讨。因此, 全球气候模式降尺度耦合氮素渗漏淋失模型, 对未来气候条件、不同土壤质地和农业管理措施下的氮素淋失状况进行预警分析亦是未来农田面源氮污染的前沿领域。

## 参考文献:

- [1] Xing G X, Zhu Z L. Regional nitrogen budgets for China and its major watersheds [J]. *Biogeochemistry*, 2002, 57 (1): 405-427.
- [2] Sheldrick W F, Syers J K, Lingard J. Soil nutrient audits for China to estimate nutrient balances and output/input relationships [J]. *Agricultural Ecosystem and Environment*, 2003, 94 (3): 341-354.
- [3] Cao W, Hong H, Yue S. Modelling agricultural nitrogen contributions to the Jiulong River estuary and coastal water [J]. *Global and Planetary Change*, 2005, 47 (2-4): 111-121.
- [4] 陈子明. 氮素产量环境 [M]. 北京: 中国农业出版社, 1996.
- [5] Ceccon P. 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.
- [6] 张国梁, 章申. 农田氮素淋失研究进展 [J]. *土壤*, 1998, (6): 291-297.
- [7] 王家玉, 王胜佳, 陈义等. 稻田土壤中氮素淋失的研究 [J]. *土壤学报*, 1996, 33 (1): 28-35.
- [8] Sexton B T, Moncrief J F, Rosen C J, et al. Optimizing nitrogen and irrigation input of corn based on nitrate leaching and yield on a coarse-textured soil [J]. *Journal of Environmental Quality*, 1996, 25: 982-992.
- [9] 张学军, 赵桂芳, 朱雯清, 等. 菜田土壤氮素淋失及其调控措施的研究进展 [J]. *生态环境*, 2004, 13 (1): 105-108.
- [10] Aronsson P G, Bergström L F. Nitrate leaching from lysimeter-grown short-rotation willow coppice in relation to N-application, irrigation and soil type [J]. *Biomass and Bioenergy*, 2001, 21 (3): 155-164.
- [11] 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 (增刊): 62-66.
- [12] Jinno Y, Honna T. Nitrate leaching and nitrogen balance in turf grass field by lysimeters [J]. *Japanese Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 1999, 70 (3): 297-305.
- [13] Tan X Z, Shao D X, Liu H H, et al. Effects of alternate wetting and drying irrigation on percolation and nitrogen leaching in paddy fields [J]. *Paddy Water Environ*, 2013, 11: 381-395.
- [14] Shrestha R K, Ladha J K. Nitrate in groundwater and integration of nitrogen-catch crop in rice-sweet pepper cropping system [J]. *Soil Science Society of American Journal*, 1998, 62 (6): 1610-1619.
- [15] Cao W, Hong H, Yue S, et al. Nutrient loss from an agricultural catchment and landscape modeling in southeast China [J]. *Bulletin of Environmental Toxicology*, 2003, 71 (4): 761-767.
- [16] Cao W, Hong H, Zhang Y, et al. Nutrient export patterns from an agricultural catchment in southeast China [A]. In: Chen Y, Takarra K, Cluckie I, et al. (Eds). *GIS and Remote Sensing in Hydrology, Water Resources and Environment* [C]. UK: IAHS Press, 2004, 336-342.
- [17] Cao W, Hong H, Zhang Y, et al. Anthropogenic Nitrogen Sources and Exports in a Village-scale Catchment in Southeast China [J]. *Environmental Geochemistry and Health*, 2006, 28 (1/2): 45-51.
- [18] Allaire-Leung S E, Wu L, Mitchell J P, et al. Nitrate leaching and soil nitrate content as affected by irrigation uniformity in a carrot field [J]. *Agricultural Water Management* 2001, 48: 37-50.
- [19] 孙志梅, 薛世川, 彭正萍, 等. 影响土壤 NO<sub>3</sub>-N 淋失的因素及预防措施 [J]. *河北农业大学学报*, 2001, 24 (3): 95-99.
- [20] 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 (SI): 68-78.
- [21] Jalali M. Nitrates leaching from agricultural land in Hamadan, western Iran [J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2005, 110 (3-4): 210-218.
- [22] Lee C, Feyereisen G W, Hristov A N, et al. Effects of dietary protein concentration on ammonia volatilization, nitrate leaching, and plant nitrogen uptake from dairy manure applied to lysimeters [J]. *Journal of Environmental Quality*, 2014, 43 (1): 398-408.
- [23] 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.
- [24] Zhao Z ,Zhang H L ,Li C S , et al. Quantifying nitrogen loading from a paddy field in Shanghai ,China with modified DNDC model[J]. Agriculture Ecosystems and Environment , 2014 ,197: 212-221.
- [25] Wang G L ,Chen X P ,Cui Z L , et al. Estimated reactive nitrogen losses for intensive maize production in China [J]. Agriculture Ecosystems and Environment , 2014 ,197: 293-300.
- [26] 金 洁,杨京平. 高肥力稻田分次施氮对氮素淋失的影响 [J]. 水土保持学报,2004 ,18( 3) : 98-101.
- [27] 张福珠,熊先哲,戴同顺,等. 应用  $\delta^{15}\text{N}$  研究土壤-植物系统中氮素淋失动态 [J]. 环境科学,1984 ,5( 1) : 21-24.
- [28] Nikiema P ,Buckley K E ,Enns J M et al. Effects of liquid hog manure on soil available nitrogen status , nitrogen leaching losses and wheat yield on a sandy loam soil of Western Canada [J]. Canadian Journal of Soil Science , 2013: 93( 5) : 573-584.
- [29] Basso B ,Ritchie J T. Impact of compost , manure and inorganic fertilizer on nitrate leaching and yield for a 6-year maize – alfalfa rotation in Michigan [J]. Agriculture , Ecosystems and Environment , 2005 ,108( 4) : 329-341.
- [30] Li W ,Li L ,Sun J , et al. Effects of intercropping and nitrogen application on nitrate present in the profile of an Orthic Anthrosol in Northwest China [J]. Agriculture , Ecosystems and Environment , 2005 ,105: 483-491.
- [31] Gårdenäs A I ,Hopmans J W ,Hanson BR et al. Two-dimensional modeling of nitrate leaching for various fertigation scenarios under micro-irrigation [J]. Agricultural Water Management , 2005 ,74( 3) : 219-242.
- [32] Siyal A A ,Bristow K L ,Simunek J. Minimizing nitrogen leaching from furrow irrigation through novel fertilizer placement and soil surface management strategies [J]. Agricultural Water Management , 2012 ,115: 242-251.
- [33] Fangueiro D ,Surgy S ,Napier V et al. Impact of slurry management strategies on potential leaching of nutrients and pathogens in a sandy soil amended with cattle slurry [J]. Journal of Environmental Management , 2014 ,146: 198-205.
- [34] Bakhsh A ,Kanwar R S ,Jaynes D B , et al. Prediction of  $\text{NO}_3^-$  losses with subsurface drainage water from manured and unfertilized plots using GLEAMS [J]. American Society of Agricultural and Biological Engineers , 2000 ,43( 1) : 69-77.
- [35] De Paz J M ,Ramos C. Simulation of nitrate leaching for different nitrogen fertilization rates in a region of Valencia ( Spain) using a GIS – GLEAMS system [J]. Agriculture , Ecosystems and Environment , 2004 ,103( 1) : 59-73.
- [36] Diez-Lopez J A ,Hernaiz-Algarra P , Arauzo-Sanchez M et al. Effect of a nitrification inhibitor ( DMPP) on nitrate leaching and maize yield during two growing seasons [J]. Span J Agric Res , 2008 ,6: 294-303.
- [37] Aronsson H ,Stenberg M. Leaching of nitrogen from a 3-yr grain crop rotation on a clay soil [J]. Soil Use Manag ,2010 ,26: 274-285.
- [38] Bakhsh A ,Kanwar R S ,Baker J L. N-application methods and precipitation pattern effects on subsurface drainage nitrate losses and crop yields [J]. Water Air Soil Pollut , 2010 ,212: 65-76.
- [39] 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]. Journal Soils Sediments , 2010 ,10: 9-17.
- [40] Sorensen P ,Rubaek G H. Leaching of nitrate and phosphorus after autumn and spring application of separated solid animal manures to winter wheat [J]. Soil Use Manag ,2012 ,28: 1-11.
- [41] Mahboubeh Z ,Mohsen J. Leaching of nitrogen from calcareous soils in western Iran: a soil leaching column study [J]. Environ Monit Assess ,2012 ,184: 7607-7622.
- [42] Poch-Massegu R ,Jimenez-Martinez 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: 1-13.
- [43] Waddell J T ,Weil R R. Effects of fertilizer placement on solute leaching under ridge tillage and no tillage [J]. Soil and Tillage Research , 2006 ,90( 1-2) : 194-204.
- [44] 曹巧红,龚元石. 降水影响冬小麦灌溉农田水分渗漏和氮淋失模拟分析 [J]. 中国农业大学学报,2003 ,8( 1) : 37-42.
- [45] Jablouna M ,Scheldea K ,Tao F , et al. Effect of temperature and precipitation on nitrate leaching from organic cereal cropping systems in Denmark [J]. European Journal of Agronomy , 2015 ,62: 55-64.
- [46] 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 ,10: 8129-8138.
- [47] Wang Q ,Li F ,Zhang E , et al. The effects of irrigation and nitrogen application rates on yield of spring wheat ( longfu-920) , and water use efficiency and nitrate nitrogen accumulation in soil [J]. Australian Journal of Crop Science , 2012 ,6( 4) : 662-672.
- [48] 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.
- [49] 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]. 农业工程学报,2004 ,20( 5) : 105-109.
- [50] Peng S Z ,He Y P ,Yang S H , et al. Effect of controlled irrigation and drainage on nitrogen leaching losses from paddy fields [EB/OL]. Paddy and Water Environment , <http://link.springer.com/article/10.1007%2Fs10333-014-0442-2> , 2014.
- [51] Diez J A ,Roman R ,Caballero R , et al. Nitrate leaching from soils under a maize-wheat-maize sequence , two irrigation schedules and three types of fertilizers [J]. Agriculture , Ecosystems and Environment , 1997 ,65: 189-199.
- [52] Ng H Y F ,Tan C S ,Drury C F , et al. Controlled drainage and subirrigation influences tile nitrate loss and corn yields in a sandy loam soil in Southwestern Ontario [J]. Agriculture , Ecosystems and Environment , 2002 ,90( 1) : 81-88.



- [53] Jia X C, Shao L J, Liu Peng, et al. Effect of different nitrogen and irrigation treatments on yield and nitrate leaching of summer maize (*Zea mays* L.) under lysimeter conditions [J]. *Agricultural Water Management*, 2014, 137(1): 92-103.
- [54] Blicher-Mathiesen G, Andersen H E, Larsen S E. Nitrogen field balances and suction cup-measured N leaching in Danish catchments [J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2014, 196: 69-75.
- [55] Zhao X, Wang S Q, Xing G X. Nitrification, acidification, and nitrogen leaching from subtropical cropland soils as affected by rice straw-based biochar: laboratory incubation and column leaching studies [J]. *J Soils Sediments*, 2014, 14: 471-482.
- [56] Correa R S, White R E, Weatherley A J. Effect of compost treatment of sewage sludge on nitrogen behavior in two soils [J]. *Waste Management*, 2006, 26(6): 614-619.
- [57] Beaudoin N, Saad J K, Van Laethem C, et al. Nitrate leaching in intensive agriculture in Northern France: Effect of farming practices, soils and crop rotations [J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2005, 111(1-4): 292-310.
- [58] Mantova P, Fumagalli L, Beretta G P, et al. Nitrate leaching through the unsaturated zone following pig slurry applications [J]. *Journal of Hydrology*, 2006, 316(1-4): 195-212.
- [59] Yang X L, Lu Y L, Tong Y, et al. A 5-year lysimeter monitoring of nitrate leaching from wheat - maize rotation system: Comparison between optimum N fertilization and conventional farmer N fertilization [J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2015, 199: 34-42.
- [60] Ritter W F, Scarborough R W, Chirnside A E M. Nitrate leaching under irrigated corn [J]. *Journal of Irrigation Drainage Engineering*, 1993, 119(3): 544-553.
- [61] Perez J M S, Antiguada I, Arrate I, et al. The influence of nitrate leaching through unsaturated soil on groundwater pollution in an agricultural area of the Basque country: a case study [J]. *Science of the Total Environment*, 2003, 317(1-3): 173-187.
- [62] Cui S Y, Xue J F, Chen F, et al. Tillage effects on nitrogen leaching and nitrous oxide emission from double-cropped paddy fields [J]. *Agronomy Journal*, 2014, 106(1): 15-23.
- [63] 赵允格, 邵明安. 模拟降雨条件下成垄压实对硝态氮迁移的影响 [J]. *植物营养与肥料学报*, 2003, 9(1): 45-49.
- [64] Kladvik E J, Kaspar T C, Jaynes D B, et al. Cover crops in the upper midwestern United States: Potential adoption and reduction of nitrate leaching in the Mississippi River Basin [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2014, 69(4): 279-291.
- [65] Zhou M H, Butterbach-Bahl K. Assessment of nitrate leaching loss on a yield-scaled basis from maize and wheat cropping systems [J]. *Plant and Soil*, 2014, 374(1-2): 977-991.
- [66] Vogeler I, Green S R, Mills T, et al. Modelling nitrate and bromide leaching from sewage sludge [J]. *Soil and Tillage Research*, 2006, 89(2): 177-184.
- [67] Malone R W, Jaynes D B, Kaspar T C. Cover crops in the upper midwestern United States: Simulated effect on nitrate leaching with artificial drainage [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2014, 69(4): 292-305.
- [68] Thomsen I K. Nitrate leaching under spring barley is influenced by the presence of a ryegrass catch crop: Results from a lysimeter experiment [J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2005, 111(1/4): 21-29.
- [69] Hansen E M, Djourhuus J. Nitrate leaching as influenced by soil tillage and catch crop [J]. *Soil and Tillage Research*, 1997, 41(3-4): 203-219.
- [70] Min J, Shi W M, Xing G X, et al. Effects of a catch crop and reduced nitrogen fertilization on nitrogen leaching in greenhouse vegetable production systems [J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2011, 91(1): 31-39.
- [71] Owens L B, Edwards W M, Shipitola M J. Nitrate leaching through lysimeters in a corn soybean rotation [J]. *Soil Science Society of American*, 1995, 59(3): 902-907.
- [72] Klammer G, Fank J. Determining water and nitrogen balances for beneficial management practices using lysimeters at Wagna test site (Austria) [J]. *Science of the Total Environment*, 2014, 499: 448-462.
- [73] Craig F, Drury C S, Tan J D, et al. Water table Management Reduces Tile nitrate Loss in Continuous Corn and in a Soybean-Corn Rotation [C]. USA: 2nd International Nitrogen Conference, Potomac, Maryland, 2002. 163-169.
- [74] Brennan E B, Boyd N S, Smith R F. Winter cover crop seeding rate and variety effects during eight years of organic vegetables: III. cover crop residue quality and nitrogen mineralization [J]. *Agronomy Journal*, 2013, 105(1): 171-182.
- [75] Kavdir Y, Rasse D P, Smucker A J M. Specific contributions of decaying alfalfa roots to nitrate leaching in a Kalamazoo loam soil [J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2005, 109(1-2): 97-106.
- [76] Mitchell R, Webb J, Harrison R. Crop residues can affect N leaching over at least two winters [J]. *European Journal of Agronomy*, 2001, 15(1): 17-29.