

稻田氮素淋失测定方法的研究进展^①

张 敏^{1,2}, 田玉华¹, 尹 斌^{1*}, 朱兆良¹

(1 土壤与农业可持续发展国家重点实验室(中国科学院南京土壤研究所), 南京 210008; 2 中国科学院大学, 北京 100049)

摘 要: 氮素淋溶是稻田氮素向周围水体迁移的重要途径, 氮以 $\text{NO}_3\text{-N}$ 淋溶的形式进入水体, 造成的地下水污染问题越来越引起人们的关注, 有关稻田氮素淋溶的损失已开展了许多研究, 所采用的研究方法不一。本文总结讨论了稻田土壤氮素淋溶的常用测定方法, 主要包括土壤溶液提取法、原状土柱法、土钻取样法以及计算机模拟法和同位素示踪等方法, 分别对其优缺点以及应用进行了阐述; 同时对计算氮素渗漏总量的方法进行了总结, 主要包括水分平衡法、达西定律法、小区渗漏池法和大型原状土柱等方法, 以期对稻田氮素淋溶损失的相关研究提供技术支持和科学依据。

关键词: 稻田; 氮素淋溶; 测定方法; 渗漏量

中图分类号: S143.1; S153.5

氮是植物生长发育需要量最大的必需营养元素, 主要通过施用氮肥进入土壤而被植物吸收。过去几十年里施用化肥一直是提高世界粮食产量的重要因素之一, 正是由于化肥在作物增产中的重要作用, 自 1993 年以后, 我国一直是世界第一化肥消费大国。2010 年, 我国化肥消费量达到 5 562 万 t, 约占世界化肥总消费量的 34%, 其中氮肥约为 3 200 万 t, 为世界第一消费大国^[1]。同时, 我国也是世界上水稻种植面积最大的国家之一, 占全世界水稻种植面积的 22.3%, 稻田单季氮肥用量平均为 $\text{N } 180 \text{ kg/hm}^2$, 比世界平均用量大约高 75%^[2]。大量的氮肥施用后, 并不能被植物全部利用, 研究表明, 我国水稻生产中, 氮肥的利用率平均约为 30% ~ 35%, 高产地区甚至更低^[3-4]。氮肥投入量高、利用效率低是我国目前水稻生产中的一个突出问题。

其中, 氮以 $\text{NO}_3\text{-N}$ 淋溶的形式进入水体, 造成的地下水污染问题不容忽视, 许多资料指出, 饮用水硝酸盐浓度超过 $\text{N } 10 \text{ mg/L}$ 就会给人和牲畜带来危害^[4]。熊正琴等^[6]对江浙沪 16 个县 76 个饮用井水质的调查表明: $\text{NO}_3\text{-N}$ 超标率达 38.2%^[6], 稻田氮素淋溶损失已引起人们的广泛关注^[7]。20 世纪以来, 国内外在农田开展了大量有关氮素淋溶过程的研究, 研

究方法主要包括间接计算法和直接测定法来定量氮素淋溶^[4, 9-10], 我国对氮素淋溶研究稍晚, 主要包括室内模拟和田间原位提取渗漏液法, 也有采用计算机模型进行模拟计算。本文就稻田氮素淋洗损失研究中采用的主要方法及应用作一阐述, 为今后稻田氮素淋洗损失研究提供合适的技术支持和科学依据。

1 稻田氮素淋溶研究常用方法

氮素淋溶研究方法一般为间接计算法和直接测定法, 前者基于土壤氮素循环的质量平衡计算, 由于不易定量而应用较少, 后者以水分质量平衡为基础测定渗漏量以及其中养分的浓度, 易于定量, 应用较多^[9, 11]。直接测定法在我国应用的主要有土壤溶液提取法、土柱法和土钻取样法等。

1.1 土壤溶液提取法

土壤溶液提取器是利用负压原理的微型土壤溶液采样器, 它是一种定点定位连续采集土壤溶液动态的仪器^[12-13]。国内稻田试验使用的多是带有陶土头的提取器、溶液提取杯式收集器以及简易渗漏装置。

1.1.1 陶土头土壤溶液提取器 即在土壤一定深度埋置陶瓷头, 并接有 PVC 管, 取样前一天, 使用真空泵将 PVC 管抽为真空, 以便通过负压使土壤溶

基金项目: 农业部公益性行业科研专项(201003014)、国家重点基础研究发展计划(973 计划)项目(2013CB127400)资助。

* 通讯作者(byin@issas.ac.cn)

作者简介: 张敏(1990—), 女, 河南周口人, 硕士研究生, 主要从事土壤氮素转化与损失机理及其环境污染控制技术的研究。E-mail: mzhang@issas.ac.cn

液进入陶瓷头内,第二天从陶瓷头内抽取土壤溶液样品。该提取器可定位定时提取土壤溶液来监测土壤溶质的运动情况,已被许多国家广泛运用于生态环境监测等研究中^[7, 14]。赵旭等^[15]利用陶土头法对太湖地区稻麦轮作农田进行了 NO_3^- -N 淋溶迁移研究,研究结果表明土壤 100 cm 以上氮素淋溶量为 $\text{N } 3.46 \sim 5.82 \text{ kg/hm}^2$;田玉华等^[16]在常熟农业生态试验站对稻田氮素淋洗损失进行研究,发现 90 cm 土层处 NO_3^- -N 浓度为 $0.2 \sim 0.9 \text{ mg/L}$,整个稻季氮素淋洗量为 $\text{N } 3.2 \sim 5.6 \text{ kg/hm}^2$ 。

1.1.2 溶液提取杯式收集器 在土壤一定深度埋置吸力杯,每个杯上连有接在抽滤瓶上的出水管,瓶口另接一根管于真空泵上。定期抽取陶土吸力杯中收集的地下水^[17-18]。陈振华等^[19]利用提取杯法在沈阳应用生态研究所潮棕壤稻田进行 NO_3^- -N 渗漏试验,结果表明,氮肥用量 $\text{N } 300 \text{ kg/hm}^2$,土层 90 cm 处的 NO_3^- -N 浓度可高达 14.91 mg/L 。

1.1.3 简易渗漏装置 该渗漏装置由 PVC 管制成,上部开口,下部桶壁有小孔,底部可铺一层石英砂。将该装置埋入土壤,并采取措施避免雨水进入渗漏管内,采集水样前用泵抽干管内积水,24 h 后抽取水样^[20-21]。吕耀等^[20]在武进市雪堰桥乡进行了水稻土 NO_3^- -N 淋溶测定,试验发现 NO_3^- -N 渗漏量随施氮量增加而增加,但并非线性关系。张玉珍等^[21]对福建省漳州市南靖县小川流域进行了土壤氮素淋溶状况的研究,结果表明 1 m 处不同土地利用无机氮淋溶负荷量在 $\text{N } 11.8 \sim 54 \text{ kg/hm}^2$,其中水稻土渗漏量为 $\text{N } 48.17 \text{ kg/hm}^2$ 。

1.1.4 土壤溶液提取法评价 1) 土壤溶液提取器是直接对土壤溶液定时定位提取,在一定范围内最大程度减少安装时对土壤造成的扰动。具有轻、小、简易实用等优势,特别适用于同一土壤中连续采集土壤溶液样品以及动态研究土壤溶液实际养分浓度等^[18, 22]。

2) 当土壤溶液提取器采样时间较长时,采样系统中的微生物过程也可能导致样品发生变化,而且提取的渗滤液无法研究土壤系统中物质的平衡,此外,利用土壤溶液提取器无法得到当季淋溶的渗漏水量^[9, 11, 22]。

1.2 原状土柱法

土柱系统(Lysimeter)是指隔离或者固定一定深度和体积的土壤,在底部安装渗滤液收集装置,从而研究土壤-植物系统水肥气热变化的设施。根据土柱系统的结构和功能可以把土柱分为渗漏取样系统、原

状土柱系统、回填土柱系统和地下水交换土柱系统等几种类型,在国外应用广泛,在我国应用的主要有原状土柱系统^[23-25]。

原状土柱系统是指用外力将圆形或方形容器垂直于地面直接嵌入土体中,然后将容器和土体共同取出,并在底部铺设渗滤层,用以接收土壤渗滤液的系统。原状土柱以圆柱形为主,有少量正方形土柱^[26]。应用原状土柱进行土壤渗滤液测定研究是在 1974 年由荷兰费得(Feddes)等首先提出来的,1978 年开始在英国乃特康比实验室(Letcombe Laboratory)采用^[27],原状土柱法常用来研究农业生态系统中 NO_3^- -N 的淋溶。除了原状土柱法之外,用于土壤溶液试验的还有回填土柱和地下水交换土柱系统等,但由于各种原因其发展受到限制,应用较少,在此不作介绍。原状土柱系统可分为称重式原状土柱和非称重式原状土柱^[26]。

1.2.1 称重式原状土柱 称重式原状土柱是指在底部不仅安装真空抽滤装置,也在原状土柱底部安装称重设备,来精确描述土壤水分在土柱中运移的变化。称重式原状土柱能精确描述土壤中水分变化等参数,如土壤水分蒸发蒸腾损失总量、淋溶量等,但是建设和运行费用较高,且易出现故障,因而限制了其发展^[26, 28]。

1.2.2 非称重式原状土柱 在原装土柱系统上直接收集渗滤液,不安装称重设备。柱体材料通常为不锈钢、普通钢和 PVC 管,运用较为广泛^[27, 29]。张静等^[30]用高 110 cm、直径 80 cm 的 PVC 圆环制成的原状土柱研究了太湖地区 NO_3^- -N 淋溶,测得稻田 NO_3^- -N 淋溶量为 $\text{N } 0.86 \sim 3.01 \text{ kg/hm}^2$ 。王晓智等^[31]在江苏常熟利用原状土柱研究了稻麦轮作系统下的氮素损失,测得稻田渗滤液 NO_3^- -N 平均浓度为 0.21 mg/L 。

1.2.3 原状土柱法评价 1) 原状土柱就地培养连续取样法结构简单、方便易行,避免了其他方法研究的单一性。其可定性定量监测田间条件下土壤氮库动态变化中的氮释放与固定、吸收和淋溶等氮素营养随时间和季节变化的整个过程,对土壤几乎没有扰动和对其发育的自然过程破坏较小,对矿质化过程积累的氮的类型没有影响,也没有区域土壤类型的限制^[26-27]。

2) 原状土柱就地培养取样技术提供了田间条件下定位研究氮库变化的方法,弥补了目前田间条件下氮动态变化研究方法的不足,能较好地反映期间土壤矿质化氮时间和空间上的释放与固定、植物吸收消耗与淋溶等整个动态变化过程^[28-29]。

3) 但是通过原状土就地培养取样法得到的数据只是特定区域的数值,也较少考虑土壤水分的水平运动,最终结果可能与大田状况不一致,同时小面积土柱,会存在较强的边际效应,与田间自然情况有所不同。而且原装土柱建造费用高,受消耗的人力、物力和时间的约束,不适合应用于大范围、大尺度的农田氮淋溶评估^[28]。

1.3 土钻取样法

即在作物生长的关键时期用土钻取土来测定土壤溶液中 NO_3^- -N 含量的方法。一般取土深度为 1~2 m,该方法简单易行,是测定土壤中 NO_3^- -N 淋溶的经典方法。土钻取样法在我国早期应用较多,如刘宏斌等^[33]利用该法研究了北京市地区农田 NO_3^- -N 的累积,孙瑞娟等^[34]利用土钻取样发现土壤中碱解氮与 NO_3^- -N 存在显著相关。但是土钻取样法取样繁琐,工作量大,现在使用较少^[32-33]。

2 氮淋溶测定的其他方法

2.1 计算机模拟

在农田条件下,土壤中 NO_3^- -N 的淋洗受多种因素综合影响,包括土壤条件、气候条件、作物种植模式以及田间管理条件等,上述方法(提取法、土柱法等)只能得到具体条件下测定短期内 NO_3^- -N 的淋洗情况,且条件一旦改变就难以估计 NO_3^- -N 的淋洗变化,不适用于大范围、大尺度的区域氮淋溶评估。借助于计算机技术研究氮素淋溶过程及其定量化的模型手段成为当今氮淋溶研究的重要方法之一^[35]。用于氮素淋溶模拟的模型通常可分为统计(经验)模型和基于机理与过程(过程)模型两种,而统计模型由于受限于参数的区域性无法得到广泛应用,基于机理与过程模型的应用在国际上较受推崇^[36]。

计算机模拟可以在区域尺度上,在不同农田管理措施和气候条件下模拟作物生产及其环境效应,在评估农田氮淋溶以及进一步揭示非点源氮污染机理应用越来越广泛。常用的模型有 DNDC 模型、NLEAP 模型、LEACHM 模型和 SWAT 模型等^[36-37]。其中, DNDC(DeNitrification-DeComposition)模型将土壤水分运动与氮素生物地球化学过程相结合,是目前国际上广泛应用的农田生态系统生物地球化学过程模型之一,它具有模拟功能强大、输入参数容易获得、软件界面友好等优点,其时间步长以日为单位,适用于点位和区域尺度的任何气候带的农业生态系统,大量应用于农田温室气体排放评估之中,近年来已有众多研究者将 DNDC 模型用作流域氮淋溶机理及其

污染评价^[37]。如李虎等^[38]应用该模型对环渤海小流域农田氮素淋溶潜力进行了估算,黄秀梅等^[39]应用 DNDC 模型以及 L-THIA 模型完成了对上海郊区非点源地下水氮素污染特征的研究。

还应该注意的,计算机模拟虽然适用于非点源氮淋溶污染分析,但模拟受参数影响很大,存在偏差,在大尺度范围上的应用仍存在许多限制。需要结合大量的实际观测值,才能在不同种植模式和管理措施下进行广泛的验证和校正,更好地应用到实践中。

2.2 同位素法

^{15}N 示踪法具有安全、准确和不干扰自然等优越性,是研究农田氮素循环的有效手段之一,被广泛应用于氮素的吸收、转化和分配状况等方面的研究。张惠等^[40]利用 ^{15}N 示踪法研究稻田氮肥去向和稻田系统氮素平衡及损失风险,发现灌区稻田土壤氮素随灌溉水向土壤深层发生了淋溶迁移,水稻连作导致土壤氮素在 60~90 cm 深度富集。另外,由于 Br^- 比 ^{15}N 的化学性质更稳定,并且土壤中没有微生物参与 Br^- 的转化过程,因此应用 Br^- 标记物作为示踪离子也能准确地反映客观条件下土壤氮素的淋溶潜力,有些学者认为采用 ^{15}N 和 Br^- 相结合的方法能准确有效地研究土壤中氮素的淋溶量^[28, 41]。

3 氮淋溶渗漏量的计算

除渗漏液中氮素浓度外,稻田土壤渗漏量是计算氮素淋洗损失量的一个重要参数,关于渗漏量的测定目前常用水分平衡法、小区渗漏池法、室内模拟法和大型原状土柱法来计算氮的渗漏量。

3.1 水分平衡法

即采用水量平衡法来计算大田条件下浅层地下水渗漏水量。此方法主要用于计算浅层地下水的渗漏量,能比较好地反映大田条件下气象、土壤和作物的综合因素对土壤水分变化的影响^[22, 41-42]。

$$\Delta R_G = \Delta P - ET_S - \Delta R_S - \Delta W \quad (1)$$

式中: ΔR_G 为时段内入渗量(mm); ΔP 为时段内降雨量(mm); ET_S 为作物田间实际腾发量(mm); ΔR_S 为时段内地表径流量(mm); ΔW 为时段内土壤剖面水量增量(mm)。

具体步骤为: 确定作物田间腾发量。计算分 3 个步骤: 先用 Penman-Monteith 方程,求得参考作物的潜在腾发量 ET_0 ,再确定各作物的作物系数 K_C ,计算各作物潜在田间腾发量 ET_{CROP} ,最后确定土壤供水系数 K_S ,计算作物田间实际腾发量 ET_S 。根据产流系数和时段降雨量计算地表径流。根据时段内采

集的土壤剖面土壤水含量,计算土壤剖面水量增量。由上述各项数据及时段内降雨量就可以确定渗透水量。

3.2 达西定律法

根据 Darcy 定律,由土水势值计算实验采用某深度处的水分通量:

$$q_h = k\omega \frac{\Delta h}{L} = kAI \quad (2)$$

式中: q_h 为土体 h 处的土壤水分通量(cm^3/d), k 为渗透系数(cm/d), ω 为过水断面(cm^2), Δh 为水头损失(cm), L 为渗漏途径(cm), A 为横断面积(cm^2), I 为水力坡度^[15, 43]。

3.3 小区渗漏池法

在小区修建渗漏池,渗漏用水用容器收集。每次收到渗漏水后,将其充分混匀,测量体积并分析水样,即可得出渗漏量^[44]。

3.4 大型原状土柱法

在田间修建大型原状土柱,然后定期收集土柱底部渗出液。测定渗出液体积,经计算即可得渗漏量^[45]。

4 展望

稻田土壤中氮淋溶是氮素损失的重要途径之一,基于稻田利用方式中的稻-稻、稻-麦、稻-菜等轮作以及不同的稻田氮素淋溶研究是稻田氮素循环研究中的薄弱环节。今后土壤 NO_3^- -N 研究必然是农业和环境科学倍加关注的问题,以后的工作应加强以下几方面的研究:

1) 加强农田面源以及流域大尺度的 NO_3^- -N 淋溶污染研究及评价。我国氮淋溶一般是室内模拟和田间小区试验,多为点位尺度,但仅通过试验手段或有限数量的田间试验来定量评估氮素淋溶的污染效应还远远不够,尤其是在大尺度范围上,故借助于计算机和 GIS 技术建立流域内氮素迁移转化过程及量化研究的模型则更具有可行性。

2) 加强长期定位试验研究田间条件下氮素淋溶的迁移变化。在大田土壤不同深度安装多孔杯或陶瓷头接收土壤淋溶液,在接近自然的条件下实时监控氮素向下的迁移转化过程,并进行长期定位试验,是一种很好的监测方法。

3) 加强田间长期试验与计算机模拟方法的结合,结合大量的实际观测值,建立模型,在不同种植模式和管理措施下进行广泛的验证和校正,真正应用到实践中。这对于研究较大区域范围内的氮素淋洗量和淋洗氮素的迁移过程具有重要意义。

参考文献:

- [1] 朱兆良,金继运. 保障我国粮食安全的肥料问题[J]. 植物营养与肥料学报, 2013(19): 259-273
- [2] 朱兆良. 我国氮肥的使用现状、问题和对策[A]//李庆奎,朱兆良,于天仁. 中国农业持续发展中的肥料问题[M]. 南昌: 江西科学技术出版社, 1998: 38-51
- [3] 朱兆良,张绍林,尹斌,颜晓元. 太湖地区单季晚稻产量-氮肥施用量反应曲线的历史比较[J]. 植物营养与肥料学报, 2010, 16(1): 1-5
- [4] Liu XJ, Ai YW, Zhang FS, Lu SH, Zeng XZ, Fan MS. Crop production, nitrogen recovery and water use efficiency in rice-wheat rotation as affected by non-flooded mulching cultivation(NFMC) [J]. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 2005, 71(3): 289-299
- [5] Elrashidi MA, Mays MD, Peaslee SD. A technique to estimate nitrate-nitrogen loss by runoff and leaching for agricultural land, Lancaster county, Nebraska[J]. Communications in Soil Science and Plant Analysis, 2005, 35: 17-18, 2 593-2 615
- [6] 熊正琴,邢光喜,沈光裕,孙德玲. 太湖地区湖、河和井水中氮污染状况的研究[J]. 农村生态环境, 2002, 18(2): 29-33
- [7] Zhang JH, Liu JL, Zhang JB. Nitrate-nitrogen dynamics and nitrogen budgets in rice-wheat rotations in Taihu Lake region, China[J]. Pedosphere, 2013, 23(1): 59-69
- [8] Richter J, Roelcke M. The N-cycle as determined by intensive agriculture-examples from central Europe and China[J]. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 2000, 57: 33-46
- [9] 串丽敏,赵同科. 土壤硝态氮淋溶及氮素利用研究进展[J]. 中国农学通报, 2010, 26(11): 200-205
- [10] Shafer MJ. Nitrogen modeling for soil management[J]. Journal of Soil Water Conserve, 2002, 57: 417-424
- [11] 卜玉涛,毛昆明,张发明. 土壤氮素淋失研究进展[J]. 现代农业科技, 2010, 16: 285-286
- [12] Zhu JG, Han Y, Liu G. Nitrogen in percolation water in paddy fields with a rice/wheat rotation[J]. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 2000, 57: 75-82
- [13] Zhao X, Zhou Y, Wang SQ, Xing GX, Shi WM, Xu RK, Zhu ZL. Nitrogen balance in a highly fertilized rice-wheat double-cropping system in Southern China[J]. Soil Science Society of America Journal, 2011, 76: 1 068-1 078
- [14] 崔敏,胡承孝. 武汉市城郊区集约化露天菜地生产系统硝态氮淋溶迁移规律研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2012, 18(3): 637-644
- [15] Zhao X, Zhou Y, Min J, Wang SQ. Nitrogen runoff dominates water nitrogen pollution from rice-wheat rotation in the Taihu Lake region of China[J]. Agriculture, Ecosystems and Environment, 2012, 156: 1-11
- [16] 田玉华,尹斌,朱兆良. 稻田氮素淋洗损失研究[J]. 安徽农业科学, 2006, 34(12): 2 792-2 794
- [17] 朱安宁,张佳宝. 黄潮土的土壤水渗漏及硝态氮淋溶研究[J]. 农村生态环境, 2003, 19(1): 27-30

- [18] 胡春胜, 程一松. 太行山山前平原冬小麦田深层土体硝态氮累积特征研究[J]. 中国生态农业学报, 2001, 9(1): 19–20
- [19] 陈振华, 陈利军. 下辽河平原潮棕壤稻田的无机态氮淋溶[J]. 水土保持学报, 2006, 20(1): 59–62
- [20] 吕耀. 苏南太湖地区水稻土中硝态氮淋溶的定位研究[J]. 土壤通报, 1999, 30(3): 113–114
- [21] 张玉珍. 农田不同土地利用氮素渗漏量的研究[J]. 福州学报(自然科学版), 2006, 34(4): 620–623
- [22] 陈宝, 颜朝阳. 用土壤溶液提取器采集土壤溶液方法与效果[J]. 江苏地质, 2004, 28(3): 151–154
- [23] Yang SH, Peng SZ, Xu JZ. Nitrogen loss from paddy field with different water and nitrogen managements in Taihu Lake region of China[J]. Communications in Soil Science and Plant Analysis, 2013, 44: 16, 2 393–2 407
- [24] Gross MJ, 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
- [25] Christine L. Lysimeter Stations and Soil Hydrology Measuring Sites in Europe—purpose, Equipment, Research Results, Future Developments[D]. Austria: School of Natural Sciences at the Karl-Franzens-University Graz, 2004
- [26] 赵长盛. 武汉城郊菜地土壤氮素的转化与淋失研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2009
- [27] 赵其国, 方建安. 英国土壤学研究近况[J]. 土壤, 1985(3): 158–162
- [28] 赵长盛, 胡承孝. 土柱系统研究进展[J]. 湖北农业科学, 2011, 5(5): 879–882
- [29] Silva RG, Cameron KC, Di HJ, Jorgensen EE. A lysimeter study to investigate the effect of dairy effluent and urea on cattle urine N losses, plant uptake and soil retention[J]. Water Air and Soil Pollution, 2005, 164: 57–58
- [30] 张静, 王德建. 用原状土柱研究太湖地区稻麦轮作农田养分淋溶量[J]. 土壤, 2008, 40(4): 591–595
- [31] Wang XZ, Zhu JG, Gao R, Yasukazu H, Feng K. Nitrogen cycling and losses under rice-wheat rotations with coated urea and urea in the Taihu Lake region[J]. Pedosphere, 2007, 17(1): 62–69
- [32] Shi ZL, Li DD, Jing Q. Effects of nitrogen applications on soil nitrogen balance and nitrogen utilization of winter wheat in a rice-wheat rotation[J]. Field Crops Research, 2012, 127: 241–247
- [33] 胡立峰, 胡春胜. 不同土壤耕作法对作物产量及土壤硝态氮淋失的影响[J]. 水土保持学报, 2005, 19(6): 186–187
- [34] 孙瑞娟, 王德建, 林静慧, 刘勤, 杨林章. 长期施用有机-无机肥对太湖流域土壤肥力的影响[J]. 土壤, 2009, 41(3): 384–388
- [35] 唐国勇, 黄道友, 董成立, 张文菊, 吴金水. 土壤氮素循环模型及其模拟研究进展[J]. 应用生态学报, 2005, 16(11): 2 208–2 212
- [36] 朱波, 周明华. 紫色土坡耕地氮素淋失通量的实测与模拟[J]. 中国生态农业学报, 2013, 21(1): 102–109
- [37] Ajdary K, Singh DK, Singh AK, Khanna M. Modelling of nitrogen leaching from experimental onion field under drip fertigation[J]. Agricultural Water Management, 2007, 89 (1–2): 15–28
- [38] 李虎, 邱建国. 基于 DNDC 模型的环渤海典型小流域农田氮素淋失潜力估算[J]. 农业工程学报, 2012, 28(13): 127–132
- [39] 黄秀梅, 申广荣, 周培. 基于模型的上海郊区地下水氮素非点源污染特征研究[J]. 农业环境科学学报, 2011, 30(7): 1 378–1 384
- [40] 张惠. 黄河上游灌区稻田系统氮素气态损失及平衡研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2011: 69–72
- [41] Tian YH, Yin B, Yang LZ. Nitrogen runoff and leaching losses during rice-wheat rotations in Taihu Lake region, China[J]. Pedosphere, 2007, 17(4): 445–456
- [42] Allaire-Leunga SE, Allaire-Leunga L, Mitchell WJP. Nitrate leaching and soil nitrate content as affected by irrigation uniformity in a carrot field[J]. Agricultural Water Management, 2001, 48: 37–50
- [43] 于红梅, 李子忠, 龚元石, 陈清, 张宏彦, 曹一平. 氮肥投入水平对蔬菜地硝态氮淋洗特征的影响[J]. 土壤, 2006, 38(6): 703–706
- [44] 朱波, 汪涛. 紫色土坡耕地硝酸盐淋失特征[J]. 环境科学学报, 2008, 28(3): 525–533
- [45] 黄满湘, 章申, 张国梁. 应用大型原状土柱渗漏计测定冬小麦-夏玉米轮作期硝态氮淋失[J]. 环境科学学报, 2013, 13(1): 11–16

A Review of Methods to Determine Nitrogen Leaching in Paddy Fields

ZHANG Min^{1,2}, TIAN Yu-hua¹, YIN bin^{1*}, ZHU Zhao-liang¹

(1 *State Key Laboratory of Soil and Sustainable Agriculture (Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences)*, Nanjing 210008, China; 2 *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100049, China)

Abstract: Nitrogen leaching is an important pathway of nitrogen (N) loss from paddy fields to surrounding water, contributing nitrate pollution to groundwater. Different methods have been employed to study N leaching. In order to provide science and technology supports for study on nitrogen leaching, a summary of various study methods and their advantages or disadvantages were presented in this paper, including soil solution extractor, monolith lysimeter, soil drilling and sampling, computer models methods and stable isotope techniques, and the calculation of the nitrogen leaching, including water balance method, Darcy law method, small lysimeter method and large-scale monolith lysimeter method were also concluded in this paper.

Key words: Paddy fields; Nitrate leaching; Determination methods; Leakage