

离子型稀土矿区 土壤氮化物污染机理

■ 刘祖文 张军 著



冶金工业出版社
www.cnmp.com.cn

江西理工大学优秀学术著作出版基金资助

离子型稀土矿区 土壤氮化物污染机理

刘祖文 张 军 著



北 京

冶金工业出版社

2018

内 容 提 要

本书针对离子型稀土矿区土壤氮化物污染问题,介绍了国内外土壤氮化物迁移转化理论、赣南稀土矿区概况、稀土矿区土样采集及分析方法,研发了一套实验装置。同时分析了淋溶条件下土壤中氮化物迁移转化规律以及浸矿剂理化性质、稀土元素对土壤中氮化物迁移转化规律的影响,探究了离子型稀土矿区土壤氮化物污染机理,为离子型稀土高效开采和矿区土壤生态保护与可持续发展、南方离子型稀土矿区土壤氮化物污染防治与土壤复垦、研究无氨技术开采稀土等方面奠定一定的理论基础。

本书可供从事土壤污染防治与复垦领域的矿业工程、环境科学与工程等专业的高等院校师生及企事业单位的科技人员参考阅读。

图书在版编目(CIP)数据

离子型稀土矿区土壤氮化物污染机理/刘祖文,
张军著. —北京:冶金工业出版社, 2018. 2

ISBN 978-7-5024-7737-0

I. ①离… II. ①刘… ②张… III. ①稀土元素
矿床—矿区—氮化物—污染防治 IV. ①X53 ②X75

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 013243 号

出 版 人 谭学余

地 址 北京市东城区嵩祝院北巷 39 号 邮编 100009 电话 (010)64027926

网 址 www.cnmp. com. cn 电子信箱 yjcbbs@cnmp. com. cn

责任编辑 徐银河 王梦梦 美术编辑 吕欣童 版式设计 孙跃红

责任校对 卿文春 责任印制 牛晓波

ISBN 978-7-5024-7737-0

冶金工业出版社出版发行;各地新华书店经销;北京兰星球彩色印刷有限公司印刷

2018 年 2 月第 1 版, 2018 年 2 月第 1 次印刷

169mm×239mm; 11 印张; 2 彩页; 183 千字; 168 页

68.00 元

冶金工业出版社 投稿电话 (010)64027932 投稿信箱 tougao@cnmp. com. cn

冶金工业出版社营销中心 电话 (010)64044283 传真 (010)64027893

冶金书店 地址 北京市东四西大街 46 号(100010) 电话 (010)65289081(兼传真)

冶金工业出版社天猫旗舰店 yjgycbs. tmall. com

(本书如有印装质量问题,本社营销中心负责退换)

前 言

我国是世界上稀土资源最丰富的国家，素有“稀土王国”之称，总保有储量 TR_2O_3 约 9000 万吨。全国探明储量的矿区有 60 多处，分布于 16 个省（区），而江西省赣南地区稀土储量和产量均占全国 50% 以上。赣南稀土矿属南方离子型稀土矿，开采方法主要是原地溶浸采矿法。原地溶浸就是在不大面积破坏矿区表面植被，不大面积开挖表土和矿石的情况下，将浸出电解质溶液经浅井直接注入矿体，电解质溶液中阳离子将吸附在黏土矿物表面的稀土离子交换解吸下来，形成稀土母液，进而收集浸出母液达到回收稀土的方法。典型的离子吸附型稀土矿原地浸出开采方法所使用的电解质溶液通常是硫酸铵。在稀土开采过程中，由于部分防渗层渗漏、收集系统不完善或部分非法盗采等原因，致使在浸矿开采过程中有大量的氮化物进入到矿区土壤中，从而导致稀土矿区周边土壤中的氮化物不断累积。氮化物在土壤中不断迁移与转化，致使大部分进入水体，对土壤和周边水体均造成较大污染。

作者长期从事市政工程、环境科学与工程和安全科学与工程等方面的科研、教学工作，在离子型稀土矿绿色开采，矿区土壤、水体中氮化物、重金属迁移转化规律研究等方面形成了自身的研究特色，取得了一些研究成果。希望该书的出版能为离子型稀土矿高效开采和矿区土壤生态保护与可持续发展，为南方离子型稀土矿区土壤氮化物污染防治与土壤复垦，为研究无氨技术开采稀

土等方面奠定一定的理论基础。

全书共分为7章,第1章介绍了土壤溶质理论的发展、氮化物迁移转化规律的研究现状及其影响因素;第2章介绍了赣南稀土矿山及赣州龙南足洞矿区的基本概况;第3章介绍了土壤理化性质和土壤氮化物的分析测定方法;第4章介绍了实验装置的研制;第5章介绍了淋溶条件下土壤中氮化物迁移转化规律;第6章介绍了浸矿剂理化性质对土壤中铵态氮迁移转化规律的影响;第7章介绍了稀土元素对土壤中氮化物迁移转化规律的影响。

本书内容涉及的课题得到了国家自然科学基金项目(离子型稀土矿区土壤中氮化物迁移规律及转化机理研究,项目编号:51464014)的资助。主要工作依托江西省环境岩土与工程灾害控制重点实验室开展。研究工作还得到了南方稀土集团龙南足洞矿区,以及江西理工大学市政工程系各位老师和有关专家的悉心指导和帮助,在此一并表示衷心的感谢。

在本书所讲的研究项目实施过程中,江西理工大学硕士研究生朱强、张念、温春辉、徐春燕、张军和杨秀英做了大量的工作,付出了辛勤的汗水,也取得了较大的收获,他们攻读硕士学位期间的部分研究成果也反映到相关内容中,在此一并致以诚挚的谢意。

本书由江西理工大学优秀学术著作出版基金资助出版,在此对江西理工大学在各方面提供的支持和帮助表示感谢。

由于离子型稀土矿区土壤和周边水体中氮化物的迁移转化过程极为复杂,影响因素非常多,相关研究工作还在深入进行中,囿于学术水平,书中难免有不妥之处,敬请读者不吝指教。

作 者

2018年1月

目 录

1 绪论	1
1.1 背景	1
1.2 国内外研究现状	2
1.2.1 土壤溶质迁移理论的发展	2
1.2.2 一般土壤中氮化物迁移转化规律	3
1.2.3 稀土矿区土壤中氮化物迁移转化规律	5
1.2.4 土壤氮化物的去向途径	6
1.2.5 影响氮化物迁移转化的因素	7
2 赣南稀土矿区概况	12
2.1 赣南稀土矿区自然概况及地质水文条件	12
2.1.1 赣南稀土矿区自然概况	12
2.1.2 区域地质地貌条件	14
2.2 赣州龙南足洞矿区概况	14
2.2.1 赣州龙南足洞矿区自然概况	15
2.2.2 赣州龙南足洞矿采选工艺	15
2.3 赣南稀土矿区氮化物污染现状	19
2.4 赣州龙南足洞矿区氮化物污染分布调查	21
2.4.1 赣州龙南足洞矿区地表水氮化物污染分布调查	21
2.4.2 赣州龙南足洞矿区土壤氮化物污染分布调查	25
3 稀土矿区土样采集及其分析方法	32
3.1 土样采集、处理及储存	32

3.2 土壤理化性质测定方法	32
3.2.1 土壤含水率的测定	32
3.2.2 土壤 pH 值的测定	33
3.2.3 土壤有机质的测定	33
3.3 土壤理化性质分析	34
3.3.1 土壤含水率分析	34
3.3.2 土壤 pH 值分析	35
3.3.3 土壤有机质分析	35
3.4 土壤氮化物(氨氮、硝氮、总氮)分析测定方法	36
3.5 稀土土壤主要成分分析	37
 4 实验装置的研制	39
4.1 技术领域	39
4.2 装置研制背景	39
4.3 装置介绍	39
4.4 装置的创新性	41
4.5 装置可行性验证	43
 5 淋溶条件下土壤中氮化物迁移转化规律	46
5.1 植被和降雨对土壤中氮化物迁移转化规律的影响	46
5.1.1 研究方法	46
5.1.2 稀土矿土壤中氮化物含量的时间分布特征	49
5.1.3 稀土矿土壤中氮化物含量的空间分布特征	59
5.1.4 降雨量对氮化物淋溶的影响	66
5.1.5 植被对氮化物淋溶的影响	66
5.2 酸雨条件下土壤中氮化物迁移转化规律	67
5.2.1 实验方案	67
5.2.2 实验结果与分析	68
5.3 土壤中氮素运移机理分析	84

5.3.1 溶质在土壤中的运移理论	84
5.3.2 溶质运移方程的建立	85
5.3.3 土壤中氮素运移方程的建立	86
6 浸矿剂理化性质对土壤中铵态氮迁移规律的影响	88
6.1 铵态氮吸附性能	88
6.1.1 实验方法与步骤	88
6.1.2 结果与分析	89
6.1.3 吸附剂的表征结果	99
6.2 铵态氮迁移规律	101
6.2.1 铵态氮迁移及形态分析	101
6.2.2 pH 值对土壤中铵态氮迁移转化规律的影响	103
6.2.3 浓度对土壤中铵态氮迁移规律的影响	108
6.2.4 浸液速度对土壤中铵态氮迁移转化规律的影响	112
6.3 铵态氮迁移机理分析	116
6.3.1 土壤中硝态氮含量变化	116
6.3.2 铵态氮迁移机理	118
6.4 铵态氮迁移拟合预测分析	121
6.4.1 不同 pH 值对土壤中铵态氮垂直迁移转化的影响	122
6.4.2 不同浸液速度对土壤中铵态氮随高度迁移的影响	123
6.4.3 不同初始浓度对土壤中铵态氮随高度迁移的影响	125
6.5 浸矿剂理化性质对稀土浸出率的影响	127
6.5.1 pH 值的影响	128
6.5.2 速度的影响	130
6.5.3 浓度的影响	132
7 稀土元素对土壤中氮化物迁移转化规律的影响	135
7.1 内源性稀土元素对土壤中氮化物迁移转化的影响	135
7.1.1 试验设计	135

7.1.2 结果与分析	135
7.2 外源性稀土元素对土壤中氮化物迁移转化的影响	138
7.2.1 试验设计	139
7.2.2 数据分析	139
7.2.3 结果与分析	139
7.2.4 双因子方差分析	152
7.3 稀土元素与氮化物的作用分析	157
7.3.1 混培实验设计	157
7.3.2 结果与分析	157
7.3.3 土壤表征分析	158
7.3.4 机理分析	159
参考文献	161

附 录



绪 论

1.1 背景

我国是世界上拥有稀土资源最多的国家,享有“稀土王国”的美誉,目前已探查可开采矿区有 60 多处,遍布于 16 个区市,而江西省赣南地区稀土储量居全国之最,占全国稀土储量的 50% 以上^[1]。赣南的稀土矿属离子型稀土矿,40 多年来,其先后经历了池浸、堆浸和原地浸矿三代开采工艺。其中,池浸和堆浸工艺原理相似,均需剥离矿区表层土壤和植被,对矿体进行开挖,并将开挖后的矿土堆放在铺有塑料薄膜的浸堆场中,再向矿堆中倒入浸取剂硫酸铵溶液进行离子交换吸附,通过收集稀土母液来回收稀土。由于这两种工艺会较大面积破坏土壤生态环境,并产生大量的挖矿土和尾砂,现已逐步禁止使用^[2~4]。取而代之的是原地溶浸采矿法,被认为是目前最环保的矿山开采方式,其特点是稀土回收率较高,且无需采动矿体,只需在矿区表面开挖一些注液井和交换液收集井,然后将浸出电解质溶液硫酸铵经浅井直接注入矿体,电解质溶液中阳离子将吸附在黏土矿物表面的稀土离子交换解吸下来,稀土离子则进入土壤溶液中,并随流向下迁移逐渐流出^[5,6]。在稀土开采过程中,尽管做了人造挡板和防渗层等技术处理,但效果并不十分理想,仍会有一定数量的浸矿剂进入矿区土壤和地下水中,在降雨的冲刷和淋溶作用下,这些含氮化合物会携带重金属离子和稀土向深层土壤迁移和转化,最终进入下游水体,给矿区周边土壤和水体均造成较大污染。根据当地环保、水文等部门监测数据,作为稀土资源重点开发的赣南地区的龙南县、定南县、赣南县等的部分矿区土壤、地下及地表水体中氮化物超标尤为严重。经实

实验室对赣南龙南足洞稀土矿区矿山周边土样的测定发现：尾矿附近的池塘氨氮含量为 100~200mg/L，远远超出农作物适宜生长所需 25mg/L 的含量，从而导致矿区土壤及周边地表地下水体尤其是地下水氮化物污染严重。经监测显示，其污染组分主要有氨氮、硝酸盐氮、亚硝酸盐氮、硫酸盐等，其中氨氮高达 161.3mg/L，硝酸盐氮高达 266.2mg/L，远远超过 V 类水质标准（氨氮 0.5mg/L、硝酸盐氮 30mg/L），水质很差，无法满足饮用要求，并对矿区周边饮用水体造成严重威胁^[7]。

数十年来，国内外众多学者对氮类化合物在土壤层及地下水中的运移及转化规律进行了较为系统的研究，借助于各种室内试验、野外调查监测及数理分析等手段，取得了较好的研究成果。目前我国对氮类化合物在一般土壤中的分布特征及转化规律的研究多是通过外施氮肥，并定期对土壤分层取样，对土壤及作物根系形成的一个协作系统进行具体理论分析并建立数学模型研究，但由于这些数学模型分别设定了不同的适用条件，因而不能被广泛参考。针对含离子型稀土元素的特殊矿区土壤中氮化物迁移与转化方面的研究，目前还存在不足之处，仍然没有形成较完整的研究理论和成果用于指导实践，且大部分研究都集中在添加外源性稀土元素方面，对南方离子型稀土元素矿区土壤中氮化物迁移转化研究不多但又十分有必要。目前专门针对内源稀土元素中氮化物污染方面的研究，包括学者对一般土壤中氮化物影响机理及理论进行深入研究等方面报道均不多，相关研究成果仍然匮乏。

1.2 国内外研究现状

1.2.1 土壤溶质迁移理论的发展

溶质迁移理论是近 50 年兴起的一门新兴学科。1952 年，Lapidus 和 Amundson 提出了一个类似于对流-弥散方程（CDE）的模拟模型，由此揭开了溶质运移研究的序幕。1954 年，Scheidegg 和 Lapidus 在把方程扩张到三维情况和流场为均质稳态流的条件下，同时考虑了溶质迁移时的水动力弥散作用，推导出反映溶质迁移的概率密度函数，使溶质迁移理论的研究向前推动了一步。1956 年，Rifai 在 Scheidegg 的研究基础上，进一步考虑了溶质迁移的分子扩散作用，并引入了

“弥散度”的概念,使溶质迁移转化理论的研究更加深入。1960年,Nielson系统地论述了CDE(对流-弥散)方程的科学性和合理性,在溶质迁移转化的研究史上,具有里程碑意义。随后国内外学者为了更好地了解溶质迁移的客观规律,进行了大量的室内模拟实验和室外现场监测的研究。

现在普遍认为土壤溶质迁移理论有土壤溶质迁移几何理论、对流弥散理论和质量传递函数模型三种^[8]。为了定量描述土壤溶质迁移规律,很多学者建立了溶质迁移的定量计算模型,概括起来可分为确定性模型、随机模型和简化模型三种类型^[9,10]。早期的研究多以CDE为控制方程的确定性模型来模拟土壤中的溶质迁移规律,取得了很大成果,但是由于土壤的空间变异性,如土壤空隙分布的不均匀性、水动力弥散系数的不确定性,空隙含水率的不同,在实际生产研究的过程中,实际测量出来的数据和理论值是有一定差异的,所以Jury提出了随机模型,但是此方法同样忽视了系统中诸多因子的联合作用的影响^[11]。

我国对溶质迁移的研究起始于20世纪80年代,主要是针对农业环保部门开展,研究较多的是植物生长所需元素、重金属以及有机农药在土壤与作物中的迁移转化和最终归趋。此后叶自桐^[12]运用此理论研究了潜水和非饱和带中的水盐运动的问题。张蔚臻等人^[13]首次用数值模型来预报区域水盐,使我国的区域水盐运动研究进入了一个全新的发展阶段。

近年来,随着计算机的广泛应用和观测手段的进一步完善,对溶质迁移函数模型的研究有了由单一条件到多因素条件下溶质迁移和非均质条件下溶质迁移的发展,研究的重点是溶质迁移过程中某种物质在溶液或土壤中的传输转化和特定运移因子对溶质的影响^[14]。

1.2.2 一般土壤中氮化物迁移转化规律

1.2.2.1 一般土壤中氮化物迁移转化理论

针对一般土壤中氮化物污染问题,国内外学者对其进行了深入细致的研究,取得了较好的研究成果。美国的Hatfield教授^[15]在露天试验场进行2m×2m的微区试验,研究了非饱和土壤中 NO_3^- -N随水流的运移规律。Stevenson教授等人^[16]则对土壤硝化作用下 NO_3^- -N淋失的影响因素、迁移转化动力学和 NO_3^- -N淋失的

预防等方面都进行了细致的研究,并取得了较好的研究成果。我国在这方面的研究起步较晚,始于1976年,早期的研究主要集中在氮化物的迁移流向等方面。如李久生等人^[17]利用室内土柱试验,对施肥条件下滴灌点源硝态氮的分布规律进行了研究,结果表明,硝态氮在距滴头一定范围内分布较为均匀,在边界上则稍有累积。王康等人^[18]对节水条件下氮化物污染的环境效应进行了试验,并提出了节水条件下土壤氮化物流失及环境效应评估概念。王飞等人^[19]运用室内土柱实验,先研究了氮化合物在不同沉积物的潜流带中迁移转化路径及环境影响行为,接着在土柱顶端添加碳源,研究碳源对氮的迁移转化行为的影响,实验结果表明,氮化物在不同沉积物潜流带的迁移转化路径并不相同,推测主要与土壤介质孔隙率及其有机质含量有关。贺秋芳等人^[20]对岩溶区土壤氮化物的迁移过程进行了考察,选取重庆市典型岩溶槽谷区的灌丛和菜园地为研究对象,通过分层取样分析土壤中不同埋深氮化物含量,并用曲线拟合分析氮化物随土壤深度的变化规律,了解岩溶区土壤氮化物的垂直分布情况。李玉庆等人^[21]为了解土壤中残留农业面源污染物的迁移转化规律及分布特征,选取郭灌区这个典型灌域为研究区域,并将待研究区段划分为10组,通过抽取不同区段不同深度水样并对其进行水质观测和数据处理,分析铵氮、硝态氮以及磷酸盐在土壤垂向剖面上的迁移转化特征。杨毓峰等人^[22]则以中国生态系统研究网络 CERN 为研究手段,以武王东沟实验站的坡耕地和塬耕地为供试土壤,研究了黄土高原某旱耕地土壤中氮化物随时间变化在土壤剖面的分布特征。

1.2.2.2 一般土壤中氮化物迁移转化模型及应用

影响土壤中氮化物迁移转化的因素多种多样,各种因素之间的交互作用和复杂程度单靠野外采样监测分析和实验室模拟土柱实验很难说明清楚,为更直观地描述氮化物在土壤中迁移转化机理,科学家们在氮化物迁移转化理论上开发并建立了适合不同实验条件的数学模型,并取得了很好的研究成果。

国内方面,冯绍元等人^[23]运用二维饱和-非饱和土壤氮化物迁移转化迁移模型对旱作农田在灌溉条件下的化肥流失量进行了计算,但由于设定的时间步长较小,若将其运用于户外长时间氮化物淋失估算,将耗费大量时间,且对计算机本身性能有较高的要求,推广研究尚有一定困难。刘培斌等人^[24]则运用对流-弥散

方程建立了排水条件下田间一维饱和-非饱和土壤中氮化物迁移与转化的数学模型,该模型考虑了氮化物在土壤中的各种转化形态及土壤对其吸附与解吸作用的影响,也编辑了土壤温度和湿度等条件,并将预测值与实际测量值作了分析和验证。为了定量分析氮化合物在非饱和土壤中的运移与转化过程中的主要影响因素,雷志栋等人^[25]通过建立 HYDRUS 数学模型,并运用神经网络预测法对氮化物在非饱和土壤中的迁移进行了模拟,对一维条件下田间非饱和土壤中 NH_4^+-N 和 NO_3^--N 迁移与转化的耦合模型进行了验证。模型综合考虑了氮素矿化、吸附、硝化、反硝化、作物根系吸附等因素,得到的研究理论相对完善。冯绍元等人^[26]还在室内试验分析的基础上,根据土壤水分运移动力学原理及多孔介质溶质迁移理论,对一维条件下非饱和土壤中氮化物在土壤层中的分布特征进行了建模,并对土壤中 NH_4^+-N 迁移与转化过程的主要影响因素进行了具体分析,研究成果显著。

目前将氮化物迁移转化模型应用于实际工程的案例有很多,曹巧红等人^[27]借助 Hydrus-1D 水氮联合模型对一维非饱和介质中水分及其溶质迁移过程进行了模拟,取得了可观的研究成果。张思聪等人^[28]则以 LEACHM 数学模型为媒介,通过一年以上的田间试验,对灌溉施肥条件下根区以下硝态氮的淋流损失各影响因素进行了分析研究。杜恩昊等人^[29]对 SWMS-2D 模型进行了初步研究,发现模拟结果与实测值之间的相关性较差,无法长期真实模拟田间土壤氮化物迁移转化规律,推测这是由于田间土壤结构存在较大的时空变异,然而模型中逐日所需的运行参数相对单一。任理等人^[30,31]运用 TFM 数理模型对灌溉入渗条件下田间一维非饱和土壤中硝态氮沿土壤剖面的分布特征及运移转化进行了拟合,并由此推算出土壤中硝态氮迁移时间的概率密度函数、硝态分布量均值函数和迁移体积分数,实验期间硝态氮的实际出流浓度值十分吻合,实验运用 TFM 对试验期间硝态氮的累积淋洗量进行了估算,为后续研究奠定了很好基础。黄元仿等人^[32]尝试将土壤水分运移方程、热溶质迁移方程、氮运移函数等联合起来模拟模型与地理信息系统(GIS)相结合,将其运用于区域农田土壤水、氮化物行为的模拟计算,取得了一定的研究成果。

1.2.3 稀土矿区土壤中氮化物迁移转化规律

近些年来,稀土在土壤和植物中的残留问题已成为稀土环境问题的研究热

点^[33,34],有研究指出外源稀土进入土壤后将很快被吸附和固定^[35],被吸附的稀土很难随土壤迁移^[36],长期的施用使外源稀土不可避免的留在土壤中,对土壤肥力^[37]、土壤溶液组成^[38]、土壤微生物和酶活性^[39-41]产生显著的影响。目前国内外的研究者们就外源性稀土元素对土壤氮形态迁移转化和有效性的影响展开了一系列研究,取得了一定的研究成果。由于攻关起点晚,目前尚没有形成十分完整的研究理论和成果,且大部分都集中在针对添加外源性稀土元素方面,但对实验室研究离子型稀土矿区土壤中氮化物迁移转化规律具有良好的指导意义。

丁士明等人^[42]选取合肥市郊区典型的黄褐土进行了研究,通过将混合稀土添加到黄褐土中,设置了旱培和淹水培养两种实验条件,研究内源性稀土元素及向土壤中添加不同质量的外源稀土元素对土壤有效氮形态分布及转化特征的影响,并对影响机制进行了分析探讨。结果表明,在旱培条件下稀土对土壤氮素含量迁移变化量的影响主要体现在土壤的硝化作用上,淹水条件下则主要影响土壤的氮化过程。鲁鹏等人^[43]研究了外源稀土对土壤氮养分的影响,结果表明,施加高浓度稀土将会影响土壤中有效氮的浓度。徐星凯等人^[44]研究了稀土元素对土壤中尿素水解及其水解产物行为的影响,研究表明,施加大量稀土元素后,土壤有效氮含量明显增加。刘定芳等人^[45]研究认为,当外源稀土施入量较大时,土壤有效氮和 NH_4^+-N 含量明显降低,此研究成果有利于内源型稀土土壤方面开展研究。徐芳等人^[46]对施用铵态氮肥和尿素土壤中稀土元素含量进行了比较,结果铵态氮肥(硫酸铵)的稀土元素含量是尿素的数倍。司静等人^[47]研究了 pH 值和光照条件下镧改性膨润土对农田区河水中氮、磷的去除效果。褚海燕等人^[48]实验室研究表明,镧(La)对红壤微生物氮表现为抑制作用,土壤中镧的积累降低了土壤有效氮的含量。这些研究结果表明,外源性稀土元素对土壤中的氮化物迁移、转化具有一定的影响和交互作用,而内源性稀土土壤中氮化物作为污染物就更有研究价值。

1.2.4 土壤氮化物的去向途径

氮化物进入土壤后其去向可分为以下三部分:(1)作为氮肥被植物作物吸收;(2)残留在土壤中被吸收转化为有机氮或者固定态铵盐;(3)通过不同机制和途径损失,如地表径流、渗漏流失或者转化为其他形态氮挥发或损失(见

图 1-1)。其中地表径流和渗漏流失是氮化物最主要的损失途径，大量的强降雨会明显地导致地表径流和渗漏流失的增加。

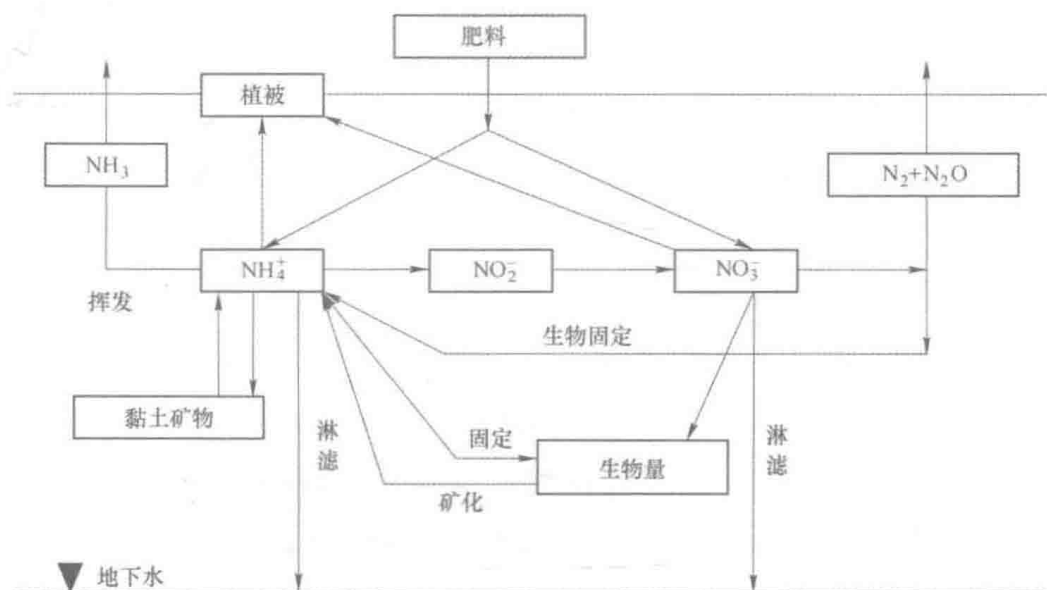


图 1-1 氮化物在土壤中迁移转化与流失途径

1.2.5 影响氮化物迁移转化的因素

1.2.5.1 施肥量

大多数学者研究结果显示，氮化物迁移转化的量随施用氮肥施入量的增加而增大，过量施用氮肥会导致土壤中 NO_3^- -N 的残存量升高，增大淋溶的可能性。Zeng 等人^[49]通过对坡地板栗园氮化物淋溶的研究结果显示，当氮肥施入量为 $94\text{kg}/\text{km}^2$ 时，总氮淋溶浓度是对照不施肥处理的 5 倍。詹议^[50]在同等管理条件下施加不同的肥量发现 NO_3^- -N 流失量及流失率均先增加后减小，而且施肥量越多，这种变化趋势也更加明显，相应的 NO_3^- -N 流失量及流失率也更大。范丙全等人^[51]通过农田小区灌水试验对硝态氮在壤质潮土的淋溶规律进行观察研究发现，硝态氮向下淋溶迁移的量与氮肥用量呈正相关，氮肥用量对硝态氮淋溶起决定性的作用。刘健^[52]通过对三种质地土壤氮化物淋溶规律的研究发现硝态氮是氮化物淋溶的主要形式，施肥量和降雨量是影响土壤氮化物淋溶的重要因素，并

且氮化物淋溶迁移随着施肥量或降雨量的增加而增大,而且还针对不同类型土壤列出了土壤各深度氮化物淋溶量和施肥量或降雨量之间的回归方程。

同时也有研究结果表明不同施氮量对黏壤土及砂壤土中硝态氮的迁移没有影响^[53]。在铵盐(NH_4^+)施入量较低的情况下,由于土壤的负电胶体的性质会吸附带有正电荷的铵根离子,土壤对铵根离子(NH_4^+)的吸附量与铵态氮(NH_4^+-N)加入量呈现很好的相关性,且随着铵态氮(NH_4^+-N)施用量的增加,其吸附率显著下降。当施肥量高时, NH_4^+-N 同样也有明显的淋溶现象发生,在pH值低、硝化能力弱的红壤土,施尿素 $750\text{kg}/\text{hm}^2$ 后,从20cm深的土壤中淋溶的铵态氮(NH_4^+-N)最高浓度值可达到 $76.94\text{mg}/\text{kg}$ 。罗微等人^[54]认为产生这种情况的原因可能是尿素起初水解产生的铵态氮(NH_4^+-N)大部分被土壤颗粒所吸附,随着尿素的进一步水解以及水分淋洗的进行,土壤颗粒吸附的铵态氮(NH_4^+-N)渐渐趋于饱和,从而越来越多的吸附态氮被交换出来并被带到土体深层。

1.2.5.2 降雨量和灌溉量

土壤中的水分是土壤氮化物淋溶损失迁移运动的载体,同时降雨和灌溉是土壤水分运动的主要动力,氮化物进入土壤后,除一部分被植物吸收利用外,残留在土壤中的氮化物则随着地表水和土壤入渗水流发生淋溶损失。

在降雨和灌溉水的冲刷作用下,土壤和肥料中的氮化物,主要以 NO_3^--N 和 NH_4^+-N 两种可溶性氮盐的形式淋溶到土壤下层。Zhang等人^[55]对内蒙古草原氮化物矿化作用的研究显示,土壤含水量高时,氮化物硝化作用强烈;当土壤含水量低于15%时,硝化作用受到抑制。研究结果指出,土壤含水量升高后,土壤中的微生物活性增强,能够促进有机物的分解,增加土壤中铵根离子浓度以促进硝化作用的进行,同时也使得硝酸根离子快速淋溶并提高了反硝化作用,但是总体作用使土壤氮化物的淋溶量增加^[56]。

有研究发现大规模的降雨或者过量灌溉导致土壤氮化物大量淋溶损失,土壤下层转移的现象明显。如Singh等人^[57]发现间隔较长的高水量灌溉可导致大量硝态氮未被作物利用而从根区土层淋溶损失。王兴武等人^[58]通过田间小区试验发现,集中、大量的降雨或过量的灌溉对硝态氮垂直运移具有明显的推动作用,高