

**Guidelines for Nitrogen Flow
Analysis in China**

中国氮素流动分析 方法指南

蔡祖聪 等 著



科学出版社

中国氮素流动分析方法指南

Guidelines for Nitrogen Flow Analysis in China

蔡祖聪 等 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书以国家重大科学研究计划项目“我国活性氮源及其对空气质量与气候变化的影响机理研究”(2014CB953800)的研究成果为基础著作而成,也包括联合国环境署(UNEP)全球环境基金(GEF)资助的,由国际氮素行动计划(INI)组织实施的全球协作项目 International Nitrogen Management System (INMS)东亚示范区的部分研究内容,用于指导活性氮在陆地、海洋、大气和人类系统之间的流动形态及其通量的定量分析。全书分四部分。第一部分(第1~2章)介绍活性氮的相关基本概念和定义及氮素形态转化的主要过程等基础知识。第二部分(第3章)介绍活性氮流动通量评估的不确定性和质量管理。第三部分(第4~18章)是全书的主体,介绍农田、草地、森林、畜禽养殖等15个系统的活性氮流动通量分析方法。第四部分(第19章)提供了全国尺度活性氮流动通量的分析案例。

本书可作为环保和相关部门开展活性氮评估的工具书,也可作为从事氮生物地球化学循环和生态环境效应研究的学者和研究生的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

中国氮素流动分析方法指南 / 蔡祖聪等著. —北京: 科学出版社, 2018. 10

ISBN 978-7-03-058915-6

I. ①中… II. ①蔡… III. ①土壤氮素-分析方法-指南 IV. ①S153.6-62

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2018) 第 218602 号

责任编辑: 王 运 赵丹丹 / 责任校对: 王 瑞

责任印制: 张 伟 / 封面设计: 铭轩堂

科学出版社 出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

北京中石油彩色印刷有限责任公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2018年10月第 一 版 开本: 787×1092 1/16

2018年11月第二次印刷 印张: 19 3/4

字数: 468 000

定价: 178.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)



主要撰写人员名单

第 1 章	蔡祖聪	谷保静		
第 2 章	谷保静			
第 3 章	蔡祖聪			
第 4 章	逯超普	颜晓元		
第 5 章	逯超普	马 林	魏志标	颜晓元
第 6 章	逯超普	颜晓元		
第 7 章	高 兵	崔胜辉		
第 8 章	李彦旻	高 兵	崔胜辉	
第 9 章	高 兵	崔胜辉		
第 10 章	高 兵	崔胜辉		
第 11 章	谷保静			
第 12 章	高 兵	崔胜辉		
第 13 章	高 兵	崔胜辉		
第 14 章	谷保静			
第 15 章	谷保静			
第 16 章	谷保静			
第 17 章	李彦旻	高 兵	崔胜辉	
第 18 章	谷保静			
第 19 章	谷保静			

前 言

20 世纪初德国科学家 Fritz Haber 和 Carl Bosch 发明了将惰性的氮气与氢气合成为氨的方法，实现了惰性氮向活性氮转化的工业化生产，该方法被后人称为 Haber-Bosch 过程。自 Haber-Bosch 过程发明以来，对环境和气候惰性的氮气 (N_2) 被源源不断地合成为具有生物、环境和气候效应的活性氮，并输入到陆地生态系统，极大地改变了陆地生态系统氮循环。目前地球陆地生态系统氮输入超过 200 Tg N a^{-1} ，比自然状态下增加 3 倍多。大量活性氮输入对粮食生产、生态环境和气候产生了深刻的影响。为了完整地认识和评估活性氮对地球系统各方面的影响，欧洲完成了《欧洲氮评估》报告。美国也对该国的氮状况进行了评估。最近，印度也完成和发表了印度的国家氮评估报告。

我国采用 Haber-Bosch 过程合成氨的工业化生产较迟，但改革开放以来，氮肥的生产量和施用量快速增长。随着经济的快速发展，矿质燃料的使用量同步快速增长。我国已经成为世界上年活性氮输入量最大的国家。大量活性氮的投入为我国实现粮食安全发挥了不可替代的作用，但同时也对生态环境产生了极为不利的影响，土壤酸化、土地次生盐渍化、水体富营养化和雾霾频发等，对我国的可持续发展提出了严峻的挑战。定量地评估活性氮在地球各系统中的流动及其流动的形态是科学地评估活性氮对生态环境和气候的影响，提高活性氮利用率，减少活性氮向环境泄漏的数据和信息基础。

科学工作者在全国尺度上对我国活性氮流动进行了大量的分析和评估。这些工作极大地提高了对我国活性氮生态环境效应的定量认识水平。但是，由于研究者采用的方法和转换系数不尽相同，得出的结果也有很大的差异，对决策者制订调控活性氮输入和流动的对策措施造成了极大的困扰。同时，也导致了大量的重复性工作。为了便于比较，我们需要统一的分析方法和依据一定原则获取的转换系数。

由于我国生物气候条件的多样性和经济发展的不平衡，我国活性氮输入量及其对生态环境影响的空间差异极其巨大。仅仅在全国尺度上分析我国活性氮的流动不能真实地反映我国活性氮流动的空间差异，也不能根据活性氮流动特点，在区域尺度上制订有针对性的措施，调控活性氮利用效率，从而减少活性氮的输入量。为了使不同行政单元评估的活性氮流动通量结果具有可比性，我们需要一种统一的分析方法和符合各地实际情况的转换系数。

基于这些考虑，依据当前的认识水平，我们编制了《中国氮素流动分析方法指南》。本指南将活性氮的流动划分为若干系统，以系统为基本单元进行氮素流动分析，并提供系统氮素流动分析涉及的转换系数。在全国尺度上，建议采用本指南提供的转换系数缺省值。如若未采用本指南提供的全部缺省值，建议研究者注明自行确定的转换系数，说明确定的依据。这样有助于避免对一些已经取得高度共识的转换系数的重复性研究，推进对一些有争议的转换系数的研究，并取得共识。在省级及其他行政单元尺度上，鼓励采用从当地获取的转换系数；若当地无可获取的转换系数，则也可采用本指南提供的缺省值。

按本指南分析获得的全国或区域系统间活性氮流动通量是评估活性氮利用率和环境效应的基础数据，研究者可以此为基础，产生次级数据，如估算全国或区域某一系统的氮利用效率，以及评估活性氮的环境影响程度等。

本指南是国家重大科学研究计划项目“我国活性氮源及其对空气质量与气候变化的影响机理研究”（2014CB953800）的成果之一，也包括联合国环境署（UNEP）全球环境基金（GEF）资助的，由国际氮素行动计划（INI）组织实施的全球协作项目 International Nitrogen Management System（INMS）东亚示范区的部分研究内容。科学技术部项目责任专家秦大河院士和丁一汇院士，项目专家组朱兆良院士、王苏民研究员、张晓山研究员、郑循华研究员、胡春胜研究员和颜晓元研究员等多次参与了本指南框架设计和书稿修改会议，为本指南成书提供了大量宝贵和建设性的建议和意见。马林研究员为本指南提供了大量的资料。巨晓棠教授和张美根研究员等部分本项目组成人员虽未直接参与本指南的撰写，但也提供了大量的建议和修改意见。王延华教授具体负责与各章作者的联系、各次会议的组织和活动安排。谨此一并致以诚挚的谢意！

由于认识水平的限制，本指南并非最终版本。真诚地希望指南的使用者发现和指出指南存在的不足，并提出修改意见。我们相信，随着研究工作的不断深入和积累，中国活性氮流动分析方法将会不断被完善，分析活性氮流动通量的转换系数将会更加接近真实。

蔡祖聪

2018年3月20日于南京

目 录

前言

第 1 章 基本概念和定义	1
1.1 目标区域的物理边界	1
1.2 功能群和系统	2
1.3 活性氮和惰性氮	3
1.4 氮循环、转化、流动、通量	4
1.5 氮质量平衡	6
1.6 氮转换系数	7
1.7 活动水平数据	8
1.8 氮循环过程术语	8
参考文献	10
第 2 章 陆地生态系统氮素流动基本过程分析	11
2.1 生物固氮	11
2.2 大气氮沉降	12
2.3 脱氮作用	13
2.4 氨挥发	14
2.5 淋溶和径流输出	16
2.6 N_2O 和 NO 排放	17
2.7 氮积累	18
2.8 有机质燃烧	19
参考文献	19
第 3 章 不确定性和质量管理	21
3.1 对氮流动过程认知的局限性	21
3.1.1 活性氮来源	21
3.1.2 活性氮转化过程	23
3.1.3 活性氮流动模型	24
3.2 基础数据的不确定性	24
3.2.1 活动水平数据	24
3.2.2 氮含量数据	25
3.2.3 氮转换系数	26
3.3 质量管理	27
参考文献	28

第4章 农田系统	29
4.1 引言	29
4.2 系统描述	30
4.3 农田系统氮素流动模型	30
4.4 氮素输入	31
4.4.1 化学氮肥	31
4.4.2 大气氮沉降	33
4.4.3 生物固氮	33
4.4.4 人畜排泄物还田	34
4.4.5 秸秆还田	36
4.4.6 灌溉水	38
4.4.7 种子	39
4.4.8 污泥	41
4.5 氮素输出	41
4.5.1 作物收获	42
4.5.2 淋溶和径流	44
4.5.3 氨挥发	46
4.5.4 脱氮	47
4.5.5 N_2O 排放	48
4.6 土壤储存	49
4.7 质量控制与保证	49
4.7.1 农田系统氮输入和输出的不确定性	49
4.7.2 减少不确定性的途径	52
参考文献	52
第5章 草地系统	55
5.1 引言	55
5.2 系统描述	56
5.3 草地系统氮素流动模型	56
5.4 氮素输入	56
5.4.1 化学氮肥	57
5.4.2 畜禽粪便	58
5.4.3 大气氮沉降	59
5.4.4 生物固氮	60
5.4.5 灌溉水	62
5.4.6 种子	63
5.5 氮素输出	63
5.5.1 牧草收获	64
5.5.2 淋溶和径流	66

5.5.3 氨挥发	67
5.5.4 脱氮	68
5.5.5 N_2O 排放	69
5.6 土壤储存	69
5.7 质量控制与保证	69
5.7.1 草地系统氮素输入和输出的不确定性	69
5.7.2 减少不确定性的途径	70
参考文献	71
第6章 森林系统	73
6.1 导言	73
6.2 系统描述	74
6.3 森林系统氮素流动模型	74
6.4 氮素输入	74
6.4.1 大气氮沉降	75
6.4.2 生物固氮	75
6.4.3 化学氮肥输入	77
6.5 氮素输出	78
6.5.1 氨挥发	78
6.5.2 淋溶和径流	79
6.5.3 脱氮	80
6.5.4 森林系统 N_2O 排放	81
6.5.5 木材输出	82
6.6 森林系统储存	83
6.7 质量控制与保证	84
6.7.1 森林系统氮素输入和输出的不确定性	84
6.7.2 减少不确定性的途径	85
参考文献	85
第7章 畜禽养殖系统	88
7.1 导言	88
7.2 系统描述	89
7.2.1 系统的定义、内涵及其外延	89
7.2.2 畜禽养殖系统与其他系统之间的氮交换	90
7.3 畜禽养殖系统氮素流动模型	90
7.4 氮素输入	91
7.4.1 作物籽粒饲料	91
7.4.2 秸秆饲料及氨化	91
7.4.3 动物性饲料	92
7.4.4 食品加工副产物	93

7.4.5 餐厨饲料	96
7.4.6 牧草饲料	97
7.4.7 其他饲料	97
7.4.8 净进口饲料	98
7.4.9 活体进口	99
7.4.10 畜禽养殖系统氮素输入的其他算法	99
7.5 氮素输出	107
7.5.1 畜禽出栏	107
7.5.2 蛋奶产品	108
7.5.3 粪尿排泄	108
7.5.4 畜禽粪尿 NH_3 挥发	113
7.5.5 畜禽粪尿脱氮	113
7.5.6 畜禽粪尿 N_2O 排放	114
7.5.7 畜禽粪尿淋洗	114
7.5.8 畜禽粪尿径流	115
7.5.9 畜禽粪尿还田	116
7.5.10 畜禽粪便燃料	116
7.5.11 死淘畜禽	118
7.5.12 畜禽活体	119
7.6 质量控制与保证	120
7.6.1 畜禽养殖系统氮输入和输出的不确定性	120
7.6.2 减少不确定性的途径	123
7.6.3 其他可提高质量、减少不确定性的因素	124
参考文献	124
第8章 水产养殖系统	127
8.1 导言	127
8.2 系统描述	128
8.2.1 系统的定义、内涵及其外延	128
8.2.2 水产养殖系统与其他系统之间的氮交换	128
8.3 水产养殖系统氮素流动模型	128
8.4 氮素输入	129
8.4.1 饵料	129
8.4.2 氮肥	131
8.4.3 大气氮沉降	131
8.4.4 野生捕捞	132
8.4.5 种苗投入	133
8.5 氮素输出	133
8.5.1 水产品收获	134

8.5.2 NH_3 挥发	134
8.5.3 脱氮	135
8.5.4 N_2O 排放	135
8.5.5 水平径流	136
8.5.6 系统氮累积	137
8.6 质量控制与保证	137
8.6.1 水产养殖系统氮输入和输出的不确定性	137
8.6.2 减少不确定性的途径	139
8.6.3 其他可提高质量、减少不确定性的因素	139
参考文献	139
第9章 城市绿地系统	142
9.1 导言	142
9.2 系统描述	143
9.2.1 系统的定义、内涵及其外延	143
9.2.2 城市绿地系统与其他系统间的氮交换	143
9.3 城市绿地系统氮素流动模型	143
9.4 氮素输入	144
9.4.1 绿地施肥	144
9.4.2 宠物粪便还绿地	146
9.4.3 大气氮沉降	147
9.4.4 生物固氮	147
9.5 氮素输出	148
9.5.1 园林绿化垃圾	148
9.5.2 城市绿地施肥和宠物粪便氮流失	149
9.6 质量控制与保证	150
9.6.1 城市绿地系统氮输入和输出的不确定性	150
9.6.2 减少不确定性的途径	151
参考文献	152
第10章 人类系统	155
10.1 导言	155
10.2 系统描述	156
10.2.1 系统的定义、内涵及其外延	156
10.2.2 人类系统与其他系统之间的氮交换	156
10.3 人类系统氮素流动模型	157
10.4 氮素输入	158
10.4.1 食物	158
10.4.2 日用品	161
10.4.3 燃料	161

10.5 氮素输出	163
10.5.1 NH_3 挥发	164
10.5.2 脱氮	166
10.5.3 N_2O 排放	166
10.5.4 粪尿还田	167
10.5.5 粪尿直接排放	167
10.5.6 粪尿污水处理	168
10.5.7 污水渗漏	168
10.5.8 人体代谢的其他氮损失	169
10.5.9 餐厨饲料	169
10.5.10 垃圾处理	173
10.5.11 家庭消费含氮工业品废弃物	176
10.6 质量控制与保证	177
10.6.1 人类系统氮输入和输出的不确定性	177
10.6.2 减少不确定性的途径	181
参考文献	182
第11章 宠物系统	186
11.1 导言	186
11.2 系统边界	186
11.3 宠物系统氮素流动模型	187
11.4 氮素输入	187
11.4.1 猫和狗饲料	187
11.4.2 猫和狗的数量	188
11.4.3 猫和狗的体重	188
11.4.4 猫和狗的单位体重需氮量	188
11.4.5 活动水平数据	188
11.5 氮素输出	188
11.5.1 草坪粪便	189
11.5.2 粪便垃圾	189
11.6 氮素积累	190
11.7 质量控制与保证	190
参考文献	190
第12章 工业过程和能源系统	192
12.1 导言	192
12.2 系统描述	193
12.2.1 系统的定义、内涵及其外延	193
12.2.2 工业过程和能源系统与其他系统之间的氮交换	193
12.3 工业过程和能源系统氮素流动模型	194

12.4 氮素输入	194
12.4.1 合成 NH_3	195
12.4.2 农产品原料	195
12.4.3 畜禽产品原料	196
12.4.4 林产品	197
12.4.5 化石燃料	197
12.5 氮素输出	198
12.5.1 食品	198
12.5.2 饲料	199
12.5.3 化学氮肥	200
12.5.4 日用品	200
12.5.5 废水	202
12.5.6 废气 N_2 排放	205
12.5.7 废气 NO_x 排放	207
12.5.8 NH_3 排放	208
12.5.9 N_2O 排放	210
12.5.10 固体废弃物	215
12.6 质量控制与保证	216
12.6.1 工业过程和能源系统氮输入和输出的不确定性	216
12.6.2 减少不确定性的途径	221
参考文献	221
第13章 固体废弃物系统	224
13.1 导言	224
13.2 系统描述	225
13.2.1 系统的定义、内涵及其外延	225
13.2.2 固体废弃物系统与其他系统间的氮交换	226
13.3 固体废弃物系统氮素流动模型	226
13.4 氮素输入	227
13.4.1 畜禽产品	227
13.4.2 生活垃圾	228
13.4.3 工业品废弃物	228
13.4.4 宠物粪便垃圾	228
13.4.5 园林绿化垃圾	228
13.4.6 污泥	228
13.5 氮素输出	228
13.5.1 垃圾堆弃	229
13.5.2 垃圾填埋	229
13.5.3 填埋渗滤液	231

13.5.4	固体废弃物处理 N_2O 排放	232
13.5.5	固体废弃物系统 NH_3 排放	234
13.5.6	垃圾 NO_x 排放	235
13.5.7	固体废弃物处理脱氮	237
13.5.8	垃圾堆肥	238
13.6	质量控制与保证	240
13.6.1	固体废弃物系统氮素输入和输出的不确定性	240
13.6.2	减少不确定性的途径	242
	参考文献	243
第14章	污水处理系统	246
14.1	导言	246
14.2	系统边界	246
14.3	污水处理系统氮素流动模型	247
14.4	氮素输入	247
14.4.1	生活污水	247
14.4.2	城市雨水	247
14.4.3	垃圾填埋渗滤液	248
14.5	氮素输出	248
14.5.1	污水渗漏到地下	248
14.5.2	N_2O 排放	248
14.5.3	NH_3 排放	248
14.5.4	污泥处理	249
14.5.5	污水处理排放	249
14.5.6	N_2 排放	249
14.6	质量控制与保证	250
	参考文献	250
第15章	地表水系统	252
15.1	导言	252
15.2	系统边界	253
15.3	地表水系统氮素流动模型	253
15.4	氮素输入	253
15.5	氮素输出	254
15.5.1	农田灌溉	254
15.5.2	N_2O 排放	254
15.5.3	排海输出	254
15.5.4	N_2 排放	255
15.6	氮素积累	256
15.7	质量控制与保证	256

参考文献	257
第 16 章 地下水系统	258
16.1 引言	258
16.2 系统边界	259
16.3 地下水系统氮素流动模型	259
16.4 氮素输入	259
16.5 氮素输出	259
16.6 氮素积累	260
16.7 质量控制与保证	260
参考文献	261
第 17 章 近海海域系统	262
17.1 引言	262
17.2 系统描述	264
17.2.1 系统的定义、内涵及其外延	264
17.2.2 近海海域系统与其他系统之间的氮交换	264
17.3 近海海域系统氮素流动模型	265
17.4 氮素输入	266
17.4.1 大气氮沉降	266
17.4.2 河流输入	267
17.4.3 污水排海	267
17.4.4 海水养殖氮输入	268
17.4.5 生物固氮	268
17.5 氮素输出	270
17.5.1 脱氮	270
17.5.2 N_2O 排放	271
17.5.3 颗粒态氮沉积	273
17.5.4 海水养殖和海洋捕捞	274
17.5.5 系统积累和远洋输出	274
17.6 质量控制与保证	274
17.6.1 近海海域系统氮输入和输出的不确定性	274
17.6.2 减少不确定性的途径	277
参考文献	277
第 18 章 大气系统	282
18.1 引言	282
18.2 系统边界	283
18.3 大气系统氮素流动模型	283
18.4 氮素输入	284
18.5 氮素输出	284

18.5.1 大气氮沉降	284
18.5.2 输出到区域外	285
18.6 氮素积累	285
18.6.1 计算过程	285
18.6.2 大气活性氮浓度	286
18.7 质量控制与保证	286
参考文献	286
第19章 中国氮素流动分析案例	288
19.1 案例背景	288
19.2 我国主要活性氮输入	289
19.3 系统尺度氮循环过程	290
19.3.1 工业过程和能源系统	291
19.3.2 农田系统	291
19.3.3 畜禽养殖系统	292
19.3.4 人类系统	292
19.3.5 大气和水体系统	293
19.3.6 其他系统	294
19.4 活性氮的系统损失和积累	294
19.5 不确定性	294
19.6 与美国和欧盟的氮通量及其健康成本比较	295
19.7 中国活性氮管理：挑战和机遇	296
参考文献	297

第1章 基本概念和定义

氮原子结构的外层有5个电子，是最变化多端的元素之一。它可以获得1~3个电子或失去1~5个外层电子，化学价从-3变化到+5，因获得或失去外层电子的多少而以气态、液态和固态存在于地球系统中。化学价为零的氮气(N_2)是一种“惰性”气体，占大气成分的78%~80%，并不参与大气化学过程，也不能被除固氮生物以外的生命体利用，对生态环境无不利影响，因而称为惰性氮(inert nitrogen)。与惰性氮相对应，能够被生物吸收利用、具有生态环境和气候效应的含氮化合物，其中的氮统称为活性氮(reactive nitrogen, Nr)，这些氮的化学价均不为零。

不同化学价态和结合形态的氮元素具有不同的生物学和环境意义。氮是一切生命的必需元素，但不同类型的生命体需求的含氮化合物不同。植物和微生物主要利用无机态的铵态氮(NH_4^+)和硝态氮(NO_3^-)，而动物，包括人类只能吸收利用氨基酸和蛋白质等有机氮。气态的 NO_x 、 NH_3 在大气中参与各种化学过程，不仅是气溶胶的重要组成部分，而且能促进气溶胶的形成。 N_2O 则是重要的温室气体，在大气中产生的温室效应仅次于 CO_2 和 CH_4 。

活性氮在地球各系统内部不断地进行着化学价态、化学组成和结合形态的变化，在地球各系统之间频繁地进行着交换。人类活动产生的活性氮，其最初的去向比较单一。例如，Haber-Bosch过程合成的氨主要用作氮肥，施用于农田；矿质燃料燃烧释放和生成的氮氧化物气体排放进入大气。但进入到农田的氮肥，经过转化可以扩散到地球各系统：以 NH_3 、 NO_x 和 N_2O 等气态排放进入大气；被作物吸收而成为人类和畜禽的食物；以水溶态的有机氮和无机态的 NO_3^- 、 NH_4^+ 等形式进入到水体。进入到大气的状态和颗粒态的氮可以传输到远离其排放源的区域，然后沉降进入到海洋、森林、草地和荒漠等地球各子系统。因此，活性氮对地球系统的影响是全方位的，包括人类健康、粮食生产、水质、空气质量、土壤质量、生物多样性和气候变化等。在空间尺度上，活性氮对地球各系统的影响既有全球性的，如 N_2O 的温室效应；也有区域性的，如水体富营养化、土壤酸化和生物多样性降低等。

氮素存在于地球表层各系统，是一切生物的必需元素，影响人类生产、生活的各个方面和生态环境质量。氮素不足或过量存在都不利于生物的生长和生物多样性。氮素流动涉及大量的概念和定义，为了使氮素流动分析获取的结果具有可比性，本章介绍指南涉及的基本概念及其定义。

1.1 目标区域的物理边界

目标区域指进行活性氮流动分析的三维空间。氮流动分析的目标区域在水平方向上的边界以一个国家或者地区的行政边界为准。如此设置物理边界的主要原因是人类活动数据