



院士科普书系

农家书屋精选本

国家重点图书

修订版

# 氮循环

——攸关农业生产、环境保护与人类健康

朱兆良 邢光杰 编著



系书

清华大学出版社  
暨南大学出版社

院士科普书系——农家书屋精选本

# 氮循环(修订版)

——攸关农业生产、环境  
保护与人类健康

朱兆良 邢光熹 编著

清华大学出版社  
暨南大学出版社  
北京

## 内 容 简 介

本书是第1版的修订本,内容包括:氮、自然界的圈层与氮循环、氮在自然界怎样循环——氮的转化和迁移、自然界氮的地球化学分配和大气—陆地—海洋氮的交换等。氮是植物营养的三要素之一,也是人和动物的营养物质成分,空气中的气体四分之三是氮气,但氮的存在形式多样,它们的转换和利用都很复杂。我们常见的是化学合成肥料氮,它们进入农田后,一部分与进入土壤中的动植物残体及人和动物的排泄物中的氮一起,经历由微生物驱动的各种转化过程,形成多种含氮气体,其中有些可直接迁移到水体,过量的氮化物,导致水体氮污染,不仅危害人体健康,而且成为水体富营养化的一个因子。二氧化氮还是一种重要的温室气体,进入大气后增强温室效应。仅此可见,氮不仅是生命必需的元素,也关系到人类生存环境。

版权所有,侵权必究。侵权举报电话:010-62782989 13701121933

### 图书在版编目(CIP)数据

氮循环:攸关农业生产、环境保护与人类健康/朱兆良,邢光熹编著. --修订本.  
--北京:清华大学出版社,2010.4  
(院士科普书系. 农家书屋精选本)  
ISBN 978-7-302-22393-1

I. ①氮… II. ①朱… ②邢… III. ①氮—循环—普及读物 IV. ①O613.61-49

中国版本图书馆CIP数据核字(2010)第060927号

责任编辑:宋成斌

责任校对:王淑云

责任印制:

出版发行:清华大学出版社

<http://www.tup.com.cn>

社总机:010-62770175

暨南大学出版社

<http://www.jnu.edu.cn>

投稿与读者服务:010-62776969, [c-service@tup.tsinghua.edu.cn](mailto:c-service@tup.tsinghua.edu.cn)

质量反馈:010-62772015, [zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn](mailto:zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn)

地 址:北京清华大学学研大厦A座

邮 编:100084

邮 购:010-62786544

地 址:广州天河

邮 编:510630

印 刷 者:

装 订 者:

经 销:全国新华书店

开 本:140×203 印 张:3.75

字 数:96千字

版 次:2010年4月第1版

印 次:2010年4月第1次印刷

印 数:1~0000

定 价:00.00元

产品编号:037063-01

## 《院士科普书系》编委会(第一届)

编委会名誉主任	周光召	宋健	朱光亚			
编委会主任	路甬祥					
编委会委员	(按姓氏笔画排序)					
	王佛松	王越	王夔	方智远	卢永根	
	母国光	旭日干	刘大响	刘元方	刘鸿亮	
	关桥	汤钊猷	许根俊	孙鸿烈	李大东	
	李廷栋	李依依	杨乐	吴有生	吴德馨	
	何凤生	何鸣元	汪旭光	汪品先	陆建勋	
	陈可冀	陈运泰	陈建生	陈厚群	范维唐	
	季国标	金怡濂	周干峙	周永茂	周恒	
	郑健超	赵忠贤	胡仁宇	钟万勰	钟南山	
	洪德元	姚福生	秦伯益	顾诵芬	钱七虎	
	徐冠华	殷瑞钰	黄志镗	龚惠兴	梁栋材	
编委会执行委员	郭传杰	葛能全	钱文藻	罗荣兴		
编委会办公室主任	罗荣兴(科学时报社)					
副主任	何仁甫(中国科学院学部联合办公室)					
	冯应章(中国工程院学部工作部)					
	蔡鸿程(清华大学出版社)					
	周继武(暨南大学出版社)					
总策划	罗荣兴 周继武 蔡鸿程					
总责任编辑	蔡鸿程 周继武 宋成斌					

## 《院士科普书系》编委会(第二届)

编委会名誉主任	周光召	宋健	朱光亚			
编委会主任	路甬祥					
编委会委员	(两院各学部主任、副主任)					
	陈佳洱	杨乐	闵乃本	陈建生	周恒	
	王佛松	白春礼	刘元方	朱道本	何鸣元	
	梁栋材	卢永根	陈可冀	匡廷云	朱作言	
	孙枢	安芷生	李廷栋	汪品先	陈颢	
	王大中	戴汝为	周炳琨	刘广均	杨叔子	
	钟万勰	关桥	吴有生	刘大响	顾国彪	
	陆建勋	龚惠兴	吴澄	李大东	汪旭光	
	陆钟武	王思敬	朱建士	郑健超	胡见义	
	陈厚群	陈肇元	崔俊芝	张锦秋	刘鸿亮	

	方智远	旭日千	周国泰	王正国	赵 铠
	钟南山	桑国卫			
<b>编委会执行委员</b>	郭传杰	常 平	钱文藻	罗荣兴	
<b>编委会办公室主任</b>	罗荣兴(科学时报社)				
<b>副主任</b>	周先路(中国科学院学部联合办公室)				
	白玉良(中国工程院学部工作部)				
	蔡鸿程(清华大学出版社)				
	周继武(暨南大学出版社)				
<b>总 策 划</b>	罗荣兴	周继武	蔡鸿程		
<b>总 责 任 编 辑</b>	周继武	蔡鸿程	宋成斌		

## 《院士科普书系》编委会(第三届)

<b>编委会名誉主任</b>	周光召	宋 健	朱光亚			
<b>编委会主任</b>	路甬祥	徐匡迪				
<b>编委会委员</b>	(两院各学部主任、副主任)					
	贺贤土	张恭庆	白以龙	艾国祥	甘子钊	白春礼
	朱道本	张礼和	佟振合	周其凤	陈宜瑜	许智宏
	朱作言	强伯勤	唐守正	孙 枢	吴国雄	张弥曼
	苏纪兰	陈 颢	周炳琨	王阳元	戴汝为	刘永坦
	徐建中	朱 静	张 泽	杨叔子	周锡元	程耿东
	张彦仲	顾国彪	王兴治	杜善义	李国杰	毛二可
	陈良惠	李德毅	周 廉	干 勇	汪燮卿	薛群基
	陈毓川	何多慧	何继善	杨奇逊	陈肇元	宁津生
	傅熹年	韩其为	石玉林	周国泰	魏复盛	戴景瑞
	赵 铠	桑国卫	顾玉东	高润霖	殷瑞钰	郭重庆
	王礼恒					
<b>编委会执行委员</b>	郭传杰	沈保根	白玉良	罗荣兴		
<b>编委会办公室主任</b>	罗荣兴(科学时报社)					
<b>副主任</b>	陈 丹(中国科学院院士工作局)					
	刘峰松(中国科学院院士工作局)					
	高中琪(中国工程院学部工作局)					
	李仁涵(中国工程院学部工作局)					
	蔡鸿程(清华大学出版社)					
	周继武(暨南大学出版社)					
<b>总 策 划</b>	罗荣兴	周继武	蔡鸿程			
<b>总 责 任 编 辑</b>	蔡鸿程	周继武	宋成斌			

# 提高全民族的科学素质

## ——序《院士科普书系》

人类走到了又一个千年之交。

人类的文明进程至少已有 6000 余年。地球上各个民族共同创造了人类文明的灿烂之花。中华文明同古埃及文明、古巴比伦文明、古印度文明、古希腊文明等一起，是人类文明的发源地。

15 世纪之前，以中华文明为代表的东方文明曾遥遥领先于当时的西方文明。从汉代到明代初期，中国的科学技术在世界上一直领先长达 14 个世纪以上。在那个时期，影响世界文明进程的重要发明中，相当部分是中华民族的贡献。

后来，中国逐渐落后了。中国为什么落后？近代从林则徐以来许多志士仁人就不断提出和思索这个历史课题，但都没有找到正确的答案。以毛泽东同志、邓小平同志为代表的中国共产党人作出了唯一正确的回答：中国落后，是由于生产力的落后和社会政治的腐朽。西方列强对中国的欺凌，更加剧了中国经济的落后和国家的衰败。而落后就要挨打。所以要进行革命，通过革命从根本上改变旧的生产关系和政治上层建筑，为解放和发展生产力开辟道路。于是，就有了 80 多年前孙中山先生领导的辛亥革命，就有了 50 年前我们党领导的新民主主义革命的胜利，以及随后进行的社会主义革命的成功。无论是革命还是我们正在进行的社会主义改革，都是为了解放和发展生产力。

邓小平同志提出的“科学技术是第一生产力”的著名论断，使我们对科学技术在经济和社会发展中的地位与作用的认识，有了新的飞跃。我们应该运用这一真理性的认识，深刻总结以往科学技术发展的历史经验，把我国科技事业更好地推向前进。中国古代科技有过辉煌的成果，但也有不足，主要是没有形成实验科学传统和完整的学科体系，科学技术没有取得应有的社会地位，更缺乏通过科技促进社会生产力发展的动力和机制。为什么近代科学技术首先在文艺复兴后的欧洲出现，而未能在中国出现，这可能是原因之一吧。而且，我国历史上虽然有着伟大而丰富的文明成果和优良的文化传统，但相对说来，全社会的科学精神不足也是一个缺陷。鉴往开来，继承以往的优秀文化，弥补历史的不足，是当代中国人的社会责任。

在新的世纪中，中华民族将实现伟大的复兴。在一个占世界人口五分之一的世界中大国里，再用 50 年的时间基本实现现代化，这又是一项惊天动地的伟业。为实现这个光辉的目标，我们应该充分发挥社会主义制度的优越性，坚持不懈地实施科教兴国战略。

科教兴国，全社会都要参与，科学家和教育家更应奋勇当先，在全社会带头弘扬科学精神，传播科学思想，倡导科学方法，普及科学知识。科教兴国也要抓好基本建设。编辑出版高质量的科普图书，就是一项基本建设，对于提高全民族的科学素质，是很有意义的。在《院士科普书系》出版之际，写了上面这些话，是为序。

江泽民

1999 年 12 月 23 日

# 人民交给的课题

## ——写在《院士科普书系》出版之际

世界正在发生深刻的变化。这一变化是20世纪以来科学技术革命不断深入的必然结果。从马克思主义的观点看来,生产力的发展是人类社会发展与文明进步的根本动力;而“科学技术是第一生产力”,因此,科学技术是推动社会发展与文明进步的革命性力量。从生产力发展的阶段看,人类走过了农业经济时代、工业经济时代,正在进入知识经济时代。

知识经济时代,知识取代土地或资本成为生产力构成的第一要素。知识不同于土地或资本,不仅仅是一种物质的形态,知识同时还是一种精神的形态。知识,首先是科学技术知识,将不仅渗透到生产过程、流通过程等经济领域,同时还将渗透到政治、法律、外交、军事、教育、文化和社会生活等一切领域。可以说,在新的历史时期,一个国家、一个民族能否掌握当代最先进的科技知识以及这些科技知识在国民中普及的程度将决定其国力的强弱与社会文明程度的高低。科技创新与科普工作是关系到一个国家、一个民族兴衰的大事。

对于我们科技工作者来说,我们的工作应当包含两个方面:发展科技与普及科技;或者说应当贯穿于知识的生产、传播及应用的全过程。我们所说的科普工作,不仅是普及科学知识,更应包括普及科学精神和科学方法。

我们的党和政府历来都十分重视科普工作。党的“十五大”更是

把树立科学精神、掌握科学方法、普及科技知识作为实施科教兴国战略和社会主义文化建设的一项重要任务提到了全党、全国人民和全体科学工作者的面前。

正是在这样的背景下,1998年春由科学时报社(当时叫“中国科学报社”)提出创意,暨南大学出版社和清华大学出版社积极筹划,会同中国科学院学部联合办公室和中国工程院学部工作部,共同发起《院士科普书系》这一重大科普工程。

1998年6月,中国科学院与中国工程院“两院”院士大会改选各学部领导班子,《院士科普书系》编委会正式成立,各学部主任均为编委会委员。编委会办公室在广泛征求意见的基础上拟出150个“提议书目”,在“两院”院士大会上向1000多名院士发出题为《请科学家为21世纪写科普书》的“约稿信”,得到了院士们的热烈响应。在此后的半年多时间里,有176名院士同编委会办公室和出版社签订了175本书的写作出版协议,开始了《院士科普书系》艰辛的创作过程。

《院士科普书系》的定位是结合当代学科前沿和我国经济建设与社会发展的热点问题,普及科技知识、科学方法。科学性、知识性、实用性和趣味性是编写的总要求。

编写科普书对我国大多数院士来说是一个新课题。他们惯于撰写学术论文。如何把专业的知识和方法写成生动、有趣、有文采的科普读物,于科技知识中融入人文教育,不是一件容易的事。不少院士反映,写科普书比写学术专著还难。但院士们还是以感人的精神完成自己的书稿。在此过程中,科学时报社和中国科学院学部联合办公室、中国工程院学部工作部以及清华大学出版社、暨南大学出版社也付出了辛勤的劳动。

《院士科普书系》首辑终于出版了。这是人民交给科学家课题，科学家向人民交出答卷。江泽民总书记专门为《院士科普书系》撰写了序言，指出科普是科教兴国的基础工程，勉励科学家、教育家“在全社会带头弘扬科学精神，传播科学思想，倡导科学方法，普及科学知识”，充分表达了党的第三代领导集体对科普的重视，对提高全民族科技素质的殷殷期望。

《院士科普书系》将采取滚动出版的模式。一方面随着院士们的创作进程，成熟一批出版一批；另一方面随着科学技术的进步和创新，不断有新的题材由新的院士作者撰写。因此，《院士科普书系》将是一个长期的、系统的科普工程。这一庞大的工程，不但需要院士们积极投入，还需要各界人士和广大读者的支持——对我们的选题和内容提出修订、完善的建议，帮助我们不断提高《院士科普书系》的水平与质量，使之成为国民科技素质教育的系统而经典的读本。在科学家群体撰写科普书方面，我们也要以此为起点为开端，参与国际竞争与合作，勇攀世界科普创作的高峰。

中国科学院院长  
《院士科普书系》编委会主任

路甬祥

2000年1月8日

## 前 言

氮循环是地球系统的一个自然过程。自从地壳形成,地球上出现了大气和水圈的分异,以及生命出现和土壤形成以来,氮循环就启动了。正是由于地球上存在氮和其他生命必需元素的循环和生命需要素水和氧的存在,才使地球生命生生不息,而成为太阳系中的一个生机勃勃的星球。

地球上的氮循环是由生活在土壤和水体中的微生物驱动的。当然,主要是土壤微生物。地球上氮的循环与其他生命元素的循环,特别是碳循环密切相关。人们对氮循环的认识和知识的积累是与微生物学的进展和对碳循环的认识紧紧地联系在一起。

20世纪50年代以前,人们对氮循环的研究及其后果的考虑都是从农业角度出发的。这是因为氮素是生命必需的营养元素,氮肥是增加农作物产量的最有效的因素之一。对于硝化反硝化、氨挥发和硝酸盐淋洗所造成的氮素损失,人们较多考虑的是农业中损失了多少氮,而很少担心排放到大气中的 $N_2O$ 、 $NO_x$ 和 $NH_3$ (氨),以及迁移到水体的 $NO_3^-$ (硝态氮)等会对环境产生多大影响。

自工业化以来,特别是到了20世纪50年代,全球人口急剧增长,工农业生产急速发展,化学氮肥和化石燃料的消耗量也陡然升高。据科学估算,到1990年,全球人为活化氮(化学合成氮,化石燃料燃烧形成的 $NO_x$ 和豆科作物及水稻扩种而增加的生物固定的氮)的数量已达到每年140TgN。而工业化前自然生物固定的氮,即通过微生物把大气中的惰性的分子氮转变为活性的氮的量为每年90~130TgN。这就是说,目前进入全球氮循环的活化氮总量比工业化前的自然生物活化的氮增加了一倍多。

由于全球人为活化氮的急剧增加,氮循环过程中形成的  $N_2O$ 、 $NO_x$ 、 $NO_3^-$ ,以及  $NH_3$  和  $NH_4^+$  等氧化态和还原态氮化合物也大大增加,从而严重地扰乱了自然界的氮循环。它们迁移到大气和水体,产生了严重的环境影响。如  $N_2O$  是一种重要的温室气体,全球 74% 左右的  $N_2O$  来自土壤。挥发到大气中的  $NH_3$ ,在大气层中消耗羟基(OH),从而影响到另一重要温室气体甲烷( $CH_4$ )的转化。挥发到大气中的  $NH_3$  和  $NO_x$  又通过大气干湿沉降分配到陆地和水体,对森林、自然湿地和水体等生态系统产生影响。 $NO_3^-$  向水体迁移加剧了水体富营养化,化石燃料燃烧形成的  $NO_x$  加剧了酸雨的危害。热带雨林砍伐后生物大量焚烧形成的  $NO_x$  也有相当的数量。最近发现农田土壤排放的  $NO_x$  也不可忽视。

人为影响下,全球氮循环过程中形成的氧化态和还原态氮化合物数量的增加所引起的环境后果,已成为目前国际上普遍关注的问题。许多跨国的氮循环项目由一些国际组织直接资助。由各种国际组织和学术机构组织的全球性和地区性氮循环学术会议和专家工作组会议活动频频。

中国是世界上化学氮肥消耗量最多的国家。1996 年中国化学氮肥的用量已达 2370 万吨 N,已接近世界化学氮肥总消耗量的 30%。中国化学氮肥用量的增加,在促进中国农产品产量的增加中起了重要作用,受到了国际上的注意;同时,中国每年投入如此巨大数量的化学氮肥,对全球和区域性环境可能产生的影响也备受国际关注!

2005 年 6 月,全球人口已达 64.77 亿,预测到 2050 年将达到 90 亿。为满足增长的人口对食物的要求,增加化学氮肥的投入仍然是无法取代的措施。化石燃料的消耗量也将大大增加。全球人为活化氮数量的进一步增加,势必对环境造成更大的压力。在不得不增加氮肥投入量的同时,寻求能减少对环境不利影响的对策是我们

---

面临的一种挑战。

面对这一挑战,我们能做些什么?首先,应该让更多的人较全面地了解全球人为活化氮的增加,一方面能有效地增加农产品产量;但另一方面又会对人类生存环境产生严重影响这一事实。这就是我们编写这本科普读物的动机。为此,我邀请了对此有共同愿望的邢光熹研究员共同完成了本书的编写。本书在有关氮素转化的某些阶段,在深度上作了一些必要的延伸,以适应不同读者。

本书涉及的外国科学家的名字均以原文写出,目前尚无统一的中文译名,任意译出将给读者带来困难。

朱兆良

2000年5月

2010年2月修订

# 目 录

<b>1 氮</b> .....	1
1.1 氮是地球上生命体的必需元素 .....	2
1.2 氮肥是农业增产要素 .....	3
1.3 氮循环过程中产生的氧化物和氢化物是危及 生态环境的有害因子 .....	6
<b>2 自然界的圈层与氮循环</b> .....	7
2.1 自然界的四个圈层 .....	9
2.2 自然界的第五个圈层：土壤圈 .....	10
2.3 自然界氮循环的一个基本图式 .....	12
<b>3 氮在自然界怎样循环——氮的转化和迁移</b> .....	16
3.1 生物固氮 .....	16
3.2 土壤无机氮的植物同化 .....	27
3.3 土壤中铵的吸附和矿物固定 .....	30
3.4 土壤无机氮的微生物固持和有机氮的矿化 .....	33
3.5 土壤氮的腐殖化 .....	37
3.6 硝化和反硝化 .....	39
3.7 氮挥发 .....	48
<b>4 自然界氮的地球化学分配和大气—陆地—海洋 氮的交换</b> .....	55
4.1 氮的地球化学分配 .....	56

4.2	大气—陆地—海洋氮的交换 .....	57
4.3	土壤和植物是地球大气—陆地—海洋氮交换中的大仓库 .....	60
<b>5</b>	<b>人为活动对自然界氮循环和环境的影响 .....</b>	<b>61</b>
5.1	人为活动改变了自然界的氮循环 .....	61
5.2	氮循环与温室效应 .....	65
5.3	N <sub>2</sub> O 与臭氧层的破坏及其后果 .....	72
5.4	氮循环与酸雨 .....	72
5.5	氮循环与水体富营养化 .....	75
5.6	硝态氮的过量摄入引起的病症 .....	78
<b>6</b>	<b>我们能做些什么 .....</b>	<b>82</b>
6.1	控制人口增长 .....	82
6.2	保护森林,植树造林 .....	84
6.3	管好用好常规能源,开发利用新能源 .....	86
6.4	减少农田氮素损失,提高氮肥利用率及其增产效果 .....	90
	<b>参考文献 .....</b>	<b>98</b>
	<b>《院士科普书系》总书目 .....</b>	<b>99</b>
	<b>再版说明 .....</b>	<b>104</b>

# 1

## 氮

---

氮是一个化学元素,它的化学符号以 N 表示。原子序数是 7。氮有 6 个同位素,其中 $^{14}\text{N}$ 和 $^{15}\text{N}$ 是稳定性同位素,即没有放射性、不会衰变的同位素。 $^{14}\text{N}$ 和 $^{15}\text{N}$ 的原子分数分别为 99.634% 和 0.366%;其他 4 个是放射性同位素。

氮元素的放射性同位素的半衰期都很短,半衰期最长的 $^{13}\text{N}$ 也只有 10.05 分。然而, $^{13}\text{N}$ 的半衰期虽然很短,许多重要的生物化学实验还是通过它来完成的。稳定性同位素 $^{15}\text{N}$ 是很有用的研究氮素在生物体内和土壤中转化的示踪剂。 $^{14}\text{N}$ 与 $^{15}\text{N}$ 只是质量数不同,它们在生物和土壤中的化学行为没有差异,因此可以用作示踪剂。所谓 $^{15}\text{N}$ 示踪剂就是根据它比 $^{14}\text{N}$ 大一个质量数的差异,作为一个记号去追踪它的行踪的一种“工具”。

什么叫同位素? 同位素是指在元素周期表中占有相同的位置,即质子数相同而中子数不同的同

位元素。任何一个元素的原子都是由带正电荷的原子核和带负电荷的电子组成的。原子核又由质子和中子所组成,原子核简称为核子。元素在周期表中的位置决定于它的质子数,元素的质子数同元素周期表的原子序数是一致的。

氮位于元素周期表中的第V族。氮的原子构造使它可以形成从负三价到正五价的化合物,如  $\text{NH}_3$ 、 $\text{N}_2\text{H}_2$ 、 $\text{N}_2\text{O}$ 、 $\text{NO}$ 、 $\text{NO}_2$ 、 $\text{NO}_2^-$ 、 $\text{NO}_3^-$  等。生物地球化学家把氮与氢和氧形成的化合物称为  $\text{NH}_x$  ( $\text{NH}_3 + \text{NH}_4^+$ ) 和  $\text{NO}_x$  ( $\text{NO} + \text{NO}_2$ )。现在又出现了  $\text{NO}_y$  这个名词,它是  $\text{NO}_x + \text{HNO}_3 + \text{NO}_3^- + \text{气溶胶} + \text{其他含氮氧化物的总称}$ ,但不包括  $\text{N}_2\text{O}$ 。两个 N 原子构成了零价的分子氮—— $\text{N}_2$ ,分子  $\text{N}_2$  以气态存在于自然界,它是大气的主成分之一,约占大气组成的 78%。 $\text{N}_2$  是惰性的,只有通过自然生物和人为活化以后才能直接进入氮的生物地球化学循环。

## 1.1 氮是地球上生命体的必需元素

地球生命是指地球上现存的生物。地球上的生物可分为动物、植物和原生生物三大类。真菌细菌属于原生物。氮是动物、植物和原生生物体的重要构成元素和维持高等动物、植物生命活动的必需元素。所谓必需元素是指生物缺少此元素就不能正常生长发育,就不能维持生命,而且此元素的功能不可能由另一元素来代替。

生命必需元素有许多种,动物、植物的生命必需元素不完全相同,但氮素是动物、植物不可代替的生命必需元素。

氮是生物体内蛋白质分子的构成元素,而蛋白质是细胞原质的重要组成部分。氮也是细胞核中核酸的组成部分。核酸是 DNA (脱氧核糖核酸) 和 RNA (核糖核酸) 的总称。以蛋白质和核酸两类生命大分子为主的有机整合,构成了今日地球生命的物质基础。恩