

# 氮肥的真实成本

作者：程存旺 石嫣 温铁军

中国人民大学 农业与农村发展学院

2010年1月

**GREENPEACE** 绿色和平

## 目 录

摘要 .....	4
1. 氮肥的使用情况 .....	5
1.1 氮肥的产量和用量 .....	5
1.2 中国氮肥肥效快速下降 .....	6
2. 氮肥的负外部性 .....	10
2.1 能源消耗巨大 .....	10
2.2 农业综合立体污染 .....	11
(1) 农田氮肥对水体的污染 .....	11
(2) 氮肥气态损失造成的温室气体排放 .....	13
(3) 氮肥对土壤的污染 .....	14
2.3 对长期粮食安全的威胁 .....	16
(1) 气候变化对粮食安全的威胁 .....	16
(2) 土质下降和土壤环境恶化对粮食安全的威胁 .....	18
2.4 过量施用氮肥对食品安全的威胁 .....	18
3. 氮肥行业的补贴 .....	20
3.1 氮肥行业直接补贴 .....	20
3.2 氮肥行业的间接补贴 .....	21
3.3 氮肥行业补贴的负面影响 .....	22
4. 国内外治理农业污染政策述评 .....	24
5. 生态农业的氮肥减量效应 .....	27

6. 支持生态农业的政策评述 .....	29
7. 结论 .....	29
8. 政策建议 .....	32

# 摘要

本文所研究的氮肥如未特殊说明，均指化学合成氮肥（CF-N）。

建国初期，国内的氮肥产量只有 0.6 万吨，小麦、玉米和水稻等主要粮食作物的总产量只有不到 1300 亿斤。随着我国化肥工业不断发展，农田水利设施的建设 and 良种的选用，我国的粮食连年增产，2009 年已经达到 10570 亿斤。氮肥对粮食增产的作用巨大。但是研究的结果表明，我国化肥氮的平均利用率仅为 30%-35%，高产地区甚至低于 30%，而流失率高达 52%-60%。据统计，中国每年因不合理施肥造成 1000 多万吨的氮素流失到农田之外，直接经济损失约 300 亿元。

氮肥的过量使用明显具有多重负外部性：不仅使得肥效急剧下降，以至于威胁到中国的长期粮食安全，而且既造成严重的环境污染；又影响食品质量。

氮肥工业还是高耗能工业，是我国节能减排的主要障碍。我国 70% 的氮肥以煤炭为主，氮肥生产年均消耗能源约 1 亿吨标准煤，而且正以每年接近 1000 万吨标准煤的速度增长。

中央财政支农补贴和氮肥行业的补贴在一定程度上促使了氮肥的过量使用。

农业面源污染对全国面源污染的贡献高达约 1/2，农业污染的治理应该以源头治理为主，而中国的生态农业在防治农业污染、促进农民增收和维护社会和谐方面都有优势，应该确立以生态农业防治农业污染的思路，并制定促进生态农业发展的政策。

《氮肥的真实成本》分析了氮肥生产、运输、使用环节所产生的和所造成的食品安全问题等负外部性；还分析了氮肥行业的补贴政策所带来的社会经济成本；并回顾了国内外治理农业面源污染的思路及政策；最后在发展生态农业防治农业污染上提出政策建议，希望为第十二个五年规划提供参考。

# 1. 氮肥的使用情况

可以很肯定地说，化肥在农业生产体系中发挥了重要作用，不仅为保障粮食安全做了贡献，还为我国工业发展提供了有力的支持。原农业部副部长、农业专家路明说，建国以来，全国有 2 亿吨化学物质用在土壤中，我们常引以自豪地讲，我们用全世界 7% 的耕地养活了 22% 的人口，但实际上我们用了世界上 35% 的化肥。

中国已经成为世界化肥生产和消费量最大的国家，其中氮肥占到了我国化肥总产量的 80%，占世界氮肥总产量的 1/3。中华氮肥网的文章指出，“我国氮肥生产在 1997 年开始盈余，而近十年氮肥产量更是以年均增长 6.7% 的速度发展，最终产能过剩。以氮肥中所占比例最大的尿素为例，2008 年底，全国尿素年产能已达 5900 万吨，当年尿素年需求量为 5000 万吨左右，产能过剩 900 万吨左右。预计 2009 年国内新增产能约为 430 万吨，总产能将达到 6300 万吨。<sup>①</sup>”

氮肥给农业带来的增产效应正在降低，而所带来的环境污染、粮食和食品安全问题却日益加剧。氮肥生产带来的能源消耗也不容忽视。国家继续补贴氮肥的生产和使用将得不偿失。

## 1.1 氮肥的产量和用量

中国是人多地少的国家，1998 年的人均耕地面积中国为 0.1 公顷/人，低于世界 0.23 公顷/人的平均水平（表格 1）。为了保障国家粮食安全，政府采取了一系列措施来增加粮食产量，包括引进高产作物、提高复种指数、改善灌溉条件和使用化肥，并取得了显著的成效。已有的研究表明，粮食作物的增产与化肥使用量增加高度相关。根据中国科学院南京土壤研究所朱兆良院士的研究，1949-1998 年每年的粮食和氮肥年用量的线性相关系数达到 0.977 (n=50) (图 1)。

---

<sup>①</sup> 资料来源：[http://www.nfert.cn/html/1037/2009820/news\\_181801\\_8635.shtml](http://www.nfert.cn/html/1037/2009820/news_181801_8635.shtml)

粮食取得高产的同时，氮肥的消耗量也逐年增加。1997年我国氮肥自给自足，到了2007年氮肥过剩近1000万吨；1960年我国氮肥使用量在50万吨左右，2005年氮肥施用量已达到近3000万吨，约为1960年的55倍。中国单位农田的氮肥施用量也远远高于世界发达国家的用量。原国家财政部农业司司长丁学东指出，中国氮肥施用量是美国的3倍，是法国的1.5倍，是德国的1.6倍（施用量为总量——作者注）<sup>1</sup>。中国农业大学的张福锁教授及其同事对中国北方两个精细化农作区进行了研究。这两个地区属于化肥使用量过剩的地区。其研究表明，中国北方地区每亩地每年所使用的氮肥约为525磅（588公斤/公顷），每亩约200磅（277公斤/公顷）过剩的氮释放到环境中。研究还表明，可在不减少产量和降低粮食质量的情况下，将氮肥使用量减少一半<sup>2</sup>。在氮肥使用过量的同时，还存在氮、磷、钾比例失调和区域间、农户间的不平衡。自然条件相近的地区，单位面积化肥用量悬殊也非常大（表格2）。

国际方面，部分发达国家也经历了氮肥过量使用的问题，1955年原西德小麦产量为2.7 t / hm<sup>2</sup>，1980年增加到4.7 t / hm<sup>2</sup>。而化肥用量则由1955年的26 kg / hm<sup>2</sup>，增加到1980年420 kg / hm<sup>2</sup>。氮肥用量增加了15倍，而小麦仅增加0.74倍，氮肥损失巨大，危害水质的氮化物55%是来自化肥。美国粮食翻番，也是以增加20倍的氮肥施用量为基础的，过量氮肥导致72%的河流受到了污染。发达国家正在全力探索化肥的替代物，重点是生态环境保护和资源高效利用技术。从发展中国家来看，以培育和应用高水肥利用的高产作物(小麦、水稻)品种为中心的“绿色革命”，虽然成效明显，但也出现氮肥流失、农药残留等污染问题。针对这种情况，国际农业研究咨询小组(CGIAR)所属的十几个国际研究中心，都对自己的研究方向和战略重点做出了全面调整，其重点之一是转向减少对化肥等农用化学品的依赖等有关农业持续性研究方面。

## 1.2 中国氮肥肥效快速下降

随着氮肥的大量使用，氮肥的肥效快速下降。反映氮肥肥效的主要指标有氮

肥生理利用率、氮肥农学利用率<sup>①</sup>和氮肥偏生产力<sup>②</sup>。Yoshida(1981)指出,在热带地区水稻的氮肥农学利用率为 15—25 kg / kg N。Cassman 等(1996)报道,在菲律宾旱季水稻的氮肥农学利用率为 15—18 kg / kg N。在中国,氮肥农学利用率 1958—1963 年为 15—20 kg / kgN, 1981—1983 年下降至 9.1kg / kgN(林葆, 1991)<sup>③</sup>。朱兆良(2006)在山东省寿光市的研究指出,对黄瓜和西红柿所施用的氮为 2,060 公斤/公顷;其中一半来自有机肥料,其养分输入的总量超过了作物生长实际需要量的 2 至 6 倍<sup>④</sup>。研究表明,随着氮肥施用量的增加,氮肥农学利用率将进一步降低。此外,中国的氮肥偏生产力略低于世界平均水平,但是显著低于日本。中国稻田单位面积氮肥用量是日本的两倍,但两者水稻产量相当(Pcng et al., 2002)。

氮肥的肥效下降直接表现为氮肥促进粮食产量增加的效率下降。朱兆良院士研究指出,粮食产量与氮肥用量的回归系数 b 值<sup>⑤</sup>在 1949-1998 这五十年间大幅下降,以 10 年为计算区间,1949-1958 年的 b 值为 178.2, 1989-1998 年的 b 值为 9.7, 1949-1998 年的平均值约为 14.5<sup>⑤</sup>(表格 3)。中英可持续农业创新协作网“改善养分管理,促进低碳经济”项目研究数据显示,即使减少 30%的氮肥用量,也不会影响到农作物的产量<sup>⑥</sup>。专家分析氮肥肥效迅速下降的主要原因是长期过量使用化肥造成的耕地贫化、土地板结和水土流失,而农民的施肥技术落后也是导致肥效下降的重要因素。专家曾做过这样的调查:大气里面随着降雨、沙尘暴等自然现象降下来的氮素,1 公顷可以达到 80 公斤,而高产小麦 1 公顷才需要 160-180 公斤氮素。也就是说种在土地中的小麦仅从大气中就获得近一半的养分,如果人们无视这部分养分的作用,仍旧按照以前的肥料用量施肥,就会造成施肥过量<sup>⑦</sup>。

过量的氮肥施用到土壤中,只有少部分被作物吸收利用。刘枫等(1998)在安徽进行的 10 年肥料定位试验证明,施肥的增产幅度随施肥年限有逐年降低的趋势。李荣刚(2000)报道,江苏省水稻的氮肥吸收利用率仅 19.9%,显著低于全国平均水平。如此低的氮肥吸收利用率主要是由于江苏稻农氮肥施用量过高所致。

<sup>①</sup> 氮肥农学利用率表示为单位施氮量增加的水稻籽粒产量。

<sup>②</sup> 氮肥偏生产力与氮肥施用量呈负相关,指施用氮肥的作物产量与施肥量的比值。它是反映当地土壤基础养分水平和化肥施用量综合效应的重要指标。

<sup>③</sup> b 值指的是单位氮肥带来的增产效果,即氮肥每增加(减)一个单位,粮食产量平均改变 b 个单位。

<sup>④</sup> 资料来源: <http://www.sainonline.org/pages/projects/lowcarbonc.html> (in English)

<sup>⑤</sup> 资料来源: [http://www.gmw.cn/CONTENT/2006-02/23/content\\_378463.htm](http://www.gmw.cn/CONTENT/2006-02/23/content_378463.htm)

介晓磊等在河南的研究表明,施氮 0~360kg/ha 下,中等肥力麦田对肥料氮的利用率为 36.9%~58.8%,而高肥力麦田对肥料氮的利用率仅有 7.4%~9.0%<sup>6</sup>;马文奇等对山东省小麦氮肥施用状况调查发现,小麦氮肥利用率仅为 10%左右,70%以上的农户超量施用氮肥,仅小麦每年超量施用的化肥氮就达 40 余万 t<sup>7</sup>。

氮肥的利用率极低,绝大部分流失到土壤,水源和空气中,造成了严重的农业非点源污染。据统计,中国每年因不合理施肥造成 1000 多万吨的氮素流失到农田之外,直接经济损失约 300 亿元。中国农科院土肥所调查显示,全国已有 17 个省氮肥平均施用量超过国际公认的上限 225 公斤/公顷。河南省农业厅土肥站一项调查表明,目前全省每年施用的 300 多万吨化肥中,只有三分之一被农作物吸收,三分之一进入大气,三分之一沉留在土壤中,残留化肥已成为巨大的污染暗流<sup>①</sup>。

过量的氮肥不仅导致污染,还有可能导致粮食减产。朱兆良(2006)的研究指出,随着氮肥使用量的增加,水稻产量渐增,但增势减缓,至最高产量后,继续增加氮肥施用量,则产量反而下降而肥料成本却增加、净收入减少,而且通过各种损失途径自农田进入环境的氮量(氮肥损失量)则迅速增加,对环境的压力增大

(图 2)。

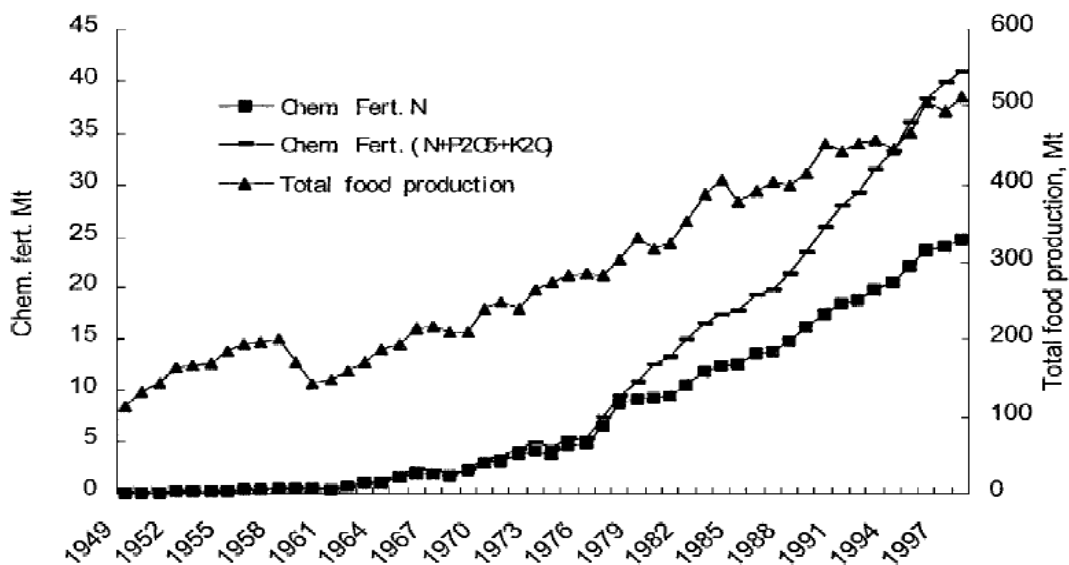


图 1. 食物生产和化肥施用量 (1949-1998)<sup>8</sup>

<sup>①</sup> 资料来源: [http://news.xinhuanet.com/focus/2004-12/28/content\\_2341637.htm](http://news.xinhuanet.com/focus/2004-12/28/content_2341637.htm)



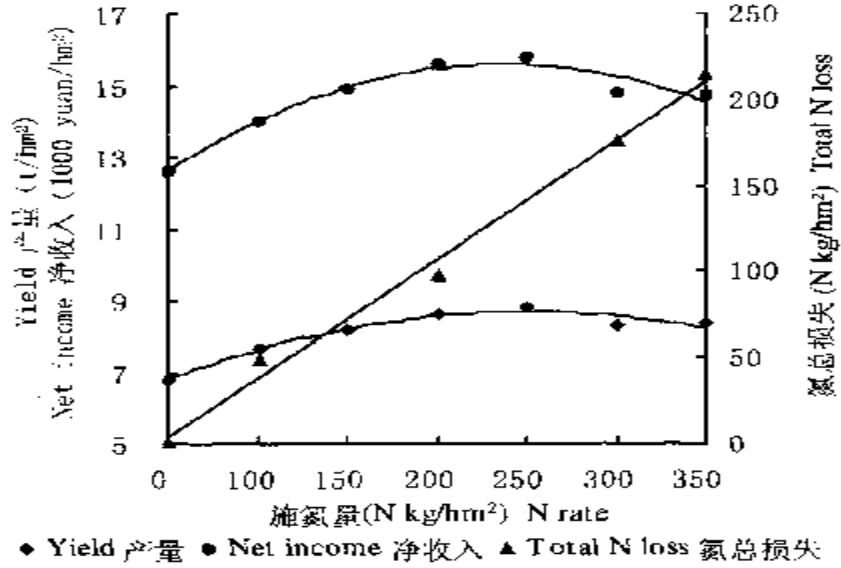


图2. 水稻产量、净收入和总损失与施氮量的关系<sup>9</sup>  
 (产量和净收入为 12 个试验结果的平均值, 总损失是由 2003 年中在两种代表性土壤上进行的<sup>15</sup>N 微区试验结果计得的平均值。)

表格.1 耕地资源和氮肥消费量的比较 (FAO database)

	1961		1980		1998	
	世界	中国	世界	中国	世界	中国
可耕地 (公顷/人均)	0.41	0.15	0.3	0.1	0.23	0.1
氮肥消费量 (千克/公顷)	9.1	5.3	45.7	125	59.7	180.8

表格 2. 1980~2000 年期间中国 2 300 个县单位播种面积化肥用量变化范围 (kg • ha-1) <sup>10</sup>

	年份	
	1980	2000
中国 2300 个县平均	87	234
用量最低的 200 个县	12	43
用量最高的 200 个县	207	532

注: 播种面积化肥用量以纯养分计

表格 3. 不同时期粮食产量 (Y) 和氮肥消费量 (X) 的线性回归分析 (Y=A+bX) <sup>11</sup>

	1949-1958	1959 - 1968	1969-1978	1979-1988	1989-1998	1949-1998
A	13301	13509	21052	18649	26427	17799
b	178.2	41.9	11.9	15.5	9.7	14.5
R <sup>2</sup>	0.913	0.954	0.831	0.918	0.931	0.977
P<	0.0002	0.0001	0.0029	0.0002	0.0001	0.0001

## 2. 氮肥的负外部性

### 2.1 能源消耗巨大

氮肥工业是以煤、石油和天然气等不可再生的资源为生产原料的，生产过程还需要消耗大量水和电，属于高耗能和高污染行业。氮肥的过量使用不仅直接造成环境污染，还间接造成能源浪费。

氮肥行业内部研究表明，2006年氮肥行业年耗天然气、无烟煤、电分别占全国总量的18.7%，22.1%和2.28%。在国家发改委确定的全国年综合能耗超过180kt标煤的1008家重点耗能企业中，氮肥企业占有165家<sup>12</sup>。中国氮肥网2009年的文章指出，我国70%的氮肥以煤炭为主，氮肥生产年均消耗能源约1亿吨标准煤，而且正以每年接近1000万吨标准煤的速度增长。我国氮肥生产70%依靠山西晋城的优质无烟煤，目前这种煤炭的供应已很难满足氮肥生产需求，而利用低质煤炭生产氮肥的技术仍未达到大范围推广程度。剩余30%的氮肥生产依靠天然气，年消耗全国近1/3的天然气<sup>①</sup>。行业研究数据清晰表明氮肥行业的高能耗情况，并且有进一步增长的趋势。若按2008年全国一次能源生产总量26亿吨标准煤和消费总量28.5亿吨标准煤计算，仅氮肥工业一项能耗就占全国一次能源总产量的3.85%，占总消费量的3.51%；若氮肥能耗增长量以1000万吨标准煤计算，则占到2008年总产量增长量的7.4%，总消费量增长量的12.2%。

氮肥行业外部关于能耗的研究较权威的有中国和英国双方科学家于2007年1月展开的“改进养分管理，减少非点源氮污染，改善农户生计”合作项目。研究指出中国农业生产和农业化学品工业消耗的化石能源占到全国化石能源消耗总量的15%<sup>②</sup>。

---

<sup>①</sup> 资料来源：[http://www.nfert.cn/html/1037/2009820/news\\_181801\\_8635.shtml](http://www.nfert.cn/html/1037/2009820/news_181801_8635.shtml)。笔者根据中国氮肥网和《中国统计年鉴》（2007）提供的数据进行粗略计算，2006年全国能源消费约为24.6270亿吨标准煤，氮肥耗能相当于全国能源总消费量的4.06%；年均1000万吨的增长量相当于2006年全国能源消费年均增长量的4.63%。

<sup>②</sup> 资料来源：<http://www.sainonline.org/pages/projects/lowcarbonc.html> (in English), <http://www.sainonline.org/pages/Projects/gaishan.html> (in Chinese)

国务院发展研究中心国际技术经济研究所《我国农业污染的现状分析及应对建议》黄皮书指出，“我国 2004 年化肥生产的能耗数据进行了测算，结果是 2004 年我国因化肥利用率低而间接浪费煤炭 2673 万吨，天然气 45 亿立方米，重油 168 万吨，电 158 亿度，分别占全国总产量的 14.1%、13.3%、0.96%和 0.72%。”<sup>13</sup>虽然数据反映的是化肥行业整体的能源浪费情况，但是氮肥占到化肥总消费量的 70%左右，能源浪费可见一斑。

## 2.2 农业综合立体污染

早在二十世纪八十年代研究人员就开始关注农业中使用化肥造成的面源污染。面源污染一般理解为分散的污染源造成的污染，污染物主要是土壤中的农业投入品(化肥、农药等)，在降雨或灌溉过程中，经地表径流、农田排水、地下渗漏等途径进入水体，造成水体污染。到了 2005 年，中国农业科学院副院长章力建等研究人员注意到农业污染呈现出立体化倾向，形成了包括点源和面源污染在内的水体——土壤——生物——大气各层面直接、复合交叉和循环式的立体污染，危害程度和防治难度都将很大。国务院发展研究中心国际技术经济研究所《我国农业污染的现状分析及应对建议》黄皮书指出：“农业污染量已占到全国总污染量（指工业污染、生活污染及农业污染的总和）的 1/3~1/2，而且对农产品安全、人体健康乃至农村和农业可持续发展构成严重威胁。”

### （1）农田氮肥对水体的污染

2007 年，82 起赤潮发生在中国海域，覆盖了 11610 平方公里的海域<sup>①</sup>，2008 年 6 月 1 日起施行的《中华人民共和国水污染防治法》首次将农业面源污染列为水污染防治对象，体现了政府对问题严重性的重视<sup>②</sup>。

中国农业科学院土壤肥料研究所的研究结果显示，在太湖流域，来源于农田、

<sup>①</sup> 资料来源：[http://news.xinhuanet.com/english/2008-01/15/content\\_7428174.htm](http://news.xinhuanet.com/english/2008-01/15/content_7428174.htm)。

<sup>②</sup> 2008年6月1日起施行的《中华人民共和国水污染防治法》第一章总则第三条中指出要防治农业面源污染，第四章水污染防治措施第四节农业和农村水污染防治第四十八条指出“县级以上地方人民政府农业主管部门和其他有关部门，应当采取措施，指导农业生产者科学、合理地施用化肥和农药，控制化肥和农药的过量使用，防止造成水污染。”

农村畜禽养殖业、城乡结合部地区的总磷分别为 20%、32% 和 23%，总氮分别为 30%、23% 和 19%，贡献率超过来自工业和城市生活的点源污染（表 4）。对滇池流域和其它流域的初步研究结果也获得同样的结论。中国科学院南京土壤研究所的研究显示，每年我国有 123.5 万吨氮通过地表水径流到江河湖泊，49.4 万吨进入地下水，299 万吨进入大气。长江、黄河和珠江每年输出的溶解态无机氮达到 97.5 万吨，其中 90%来自农业，而氮肥占了农业源的 50%。朱兆良（2002）指出氮肥污染水体的途径主要有径流和淋洗损失。

学者的研究表明，投入农田的氮肥成为地下水体氮素污染的主要来源。世界卫生组织（WHO）规定的地下水硝酸盐（硝酸盐是氮肥、动物粪便、动植物尸体等中所含氮化合物降解的终端产品）含量临界值为  $10\text{ mgNL}^{-1}$ ，调查发现我国的一些地区地下水硝酸盐含量已经超过临界值。自 1994 年以来中国农业科学院在北京、山东、陕西、河北、天津等地 20 个县 600 多个点位的抽样调查显示，在北方集约化的高肥用量地区 20% 地下水硝酸盐含量超过  $89\text{ mgNO}_3^{-1}\text{L}^{-1}$ （中国饮用水硝酸盐含量限量标准），45%地下水硝酸盐含量超过  $50\text{ mgNO}_3^{-1}\text{L}^{-1}$ （主要发达国家饮用水硝酸盐含量限量标准），个别地点硝酸盐含量超过  $500\text{ mgNO}_3^{-1}\text{L}^{-1}$ <sup>14</sup>。江苏、云南、山西等地也报道在高化肥用量农区地下水硝态氮含量超标<sup>15</sup>。刘光栋等（2004）使用人力资本法评估华北典型高产粮区桓台县农业污染地下水造成的环境价值损失，评估结果认为 2002 年以后该地区每年地下水硝酸盐污染的环境损失约为 860.8 万元，相当于每公顷农田增加外部环境成本 293.9 元/公顷<sup>16</sup>。

氮肥还引起湖泊、河流、浅海水域生态系统的富营养化，水藻疯长，鱼类等水生动物因缺氧数量减少甚至全部死亡，引发赤潮。

表格 4. 太湖流域不同污染源对水体总磷、总氮的贡献率

污染源类型	P 贡献率 (%)	N-贡献率 (%)
农田面源	19	29
畜禽业面源	35	23
城乡结合部地区生活面源	22	21
农村生活面源	8	10
工业、城市生活点源	16	17

注：贡献率指各来源所排放到水体的氮、磷数量分别占排放到水体的氮、磷总量的百分比

## (2) 氮肥气态损失造成的温室气体排放

氮主要是在土壤微生物的硝化和反硝化作用下，使部分氮肥变成  $N_2O$  或  $NH_3$  气体而进入大气环境。 $N_2O$  不仅是温室气体，还对臭氧层产生破坏，1 分子的  $N_2O$  导致气候变暖的效应与 310 分子的  $CO_2$  相当。联合国政府间气候变化专门委员会（IPCC）第三工作组第四次评估报告在 2007 年指出，农业排放的非二氧化碳温室气体占人为排放的非二氧化碳温室气体总量的 14%，其中农业生产排放了 84% 的  $N_2O$  和 47% 的  $CH_4$ 。

据估算，2000 年农业源排放甲烷占我国甲烷排放总量的 80%，排放氧化亚氮占我国氧化亚氮排放总量的 90% 以上<sup>17</sup>。2002 年我国农田化肥氮(2470 万吨)通过损失进入环境的数量达到 472 万吨：其中通过径流和淋洗损失进入地表水和地下水的氮量分别有 124 万吨和 49 万吨；有 27 万吨氮以  $N_2O$  形态进入大气，272 万吨氮以  $NH_3$  形态进入大气<sup>18</sup>。还有学者（熊正琴等，2002）通过田野数据发现，78% 的  $N_2O$  排放量来自山地，其中化肥氮的贡献率达到 74%。

中英可持续农业创新协作网“改善氮肥管理，促进低碳经济”项目的研究指出，中国农业生产和农业化学品工业消耗化石能源所排放的温室气体占到总排放的 20%。其中  $N_2O$  占到了世界化肥排放  $N_2O$  总量的 27%。该项目研究认为，在氮肥使用过量和使用效率低下的情况下，中国占世界农业排放  $N_2O$  总量的比例可能超过 50%<sup>①</sup>。

氮肥不仅会造成温室气体的排放，而且氮肥的生产过程还会造成空气污染，如制造氮肥所需的原料煤、石油和天然气在开采过程中造成的空气污染，氮肥生产设备的尾气污染等。

---

<sup>①</sup> 资料来源：<http://www.sainonline.org/pages/projects/lowcarbonc.html> (in English)

### (3) 氮肥对土壤的污染

#### 氮肥带入的重金属污染土壤

增加的土壤重金属和有毒元素重金属是化肥对土壤产生污染的主要污染物质，进入土壤后不仅不能被微生物降解，而且可以通过食物链不断在生物体内富集，甚至可以转化为毒性更大的甲基化合物，最终在人体内积累危害人体健康。土壤环境一旦遭受重金属污染就难以彻底消除。据统计，我国重金属污染的土壤面积达 2000 万公顷，占总耕地面积的 1/6<sup>①</sup>，而国务院发展研究中心国际技术经济研究所《我国农业污染的现状分析及应对建议》黄皮书则指出“目前全国有 1/5 耕地受到重金属污染，每年因此而减产粮食 1000 多万吨，另外被重金属污染的粮食每年也多达 1200 万吨，合计经济损失至少 200 亿元。”

产生污染的重金属主要有 Zn 锌、Ni 镍、Cu 铜、Co 钴和 Cr 铬。从化肥的原料开采到加工生产，总是给化肥带进一些重金属元素或有毒物质，其中以磷肥为主，不同化肥中重金属的含量可参见表格 5<sup>19</sup>。

表格 5. 某些化肥中重金属含量表 / $mg \cdot kg^{-1}$ <sup>20</sup>

肥料名称	重金属元素含量					
	Cu 铜	Zn 锌	Mn 锰	Mo 钼	Pb 铅	Cd 镉
尿素	0.36	0.5	0.5	0.2	4	1
氯化钾	3	3	8	0.2	88	14
硫酸铵	0.5	0.5	70	0.1	/	/
磷酸铵	3--4	80	115-200	2	/	/

表格 6. 蔬菜地土壤中重金属的健康风险基准（容许含量）( $mg \cdot kg^{-1}$ )<sup>21</sup>

Cd	Zn	Cu	Hg	Pb	As	Cr
0.3	200	30	0.5	20	15	15

#### 施肥结构不合理，造成土壤硝酸盐累积

大量使用氮肥且不注重 N 氮、P 磷、K 钾配合施肥将导致  $NO_3^- - N$  的累积。

<sup>①</sup> 资料来源：<http://www.eedu.org.cn/Article/es/envir/pttheory/soil/200406/1659.html>.

研究指出蔬菜地土壤硝酸盐累积量 0—150 mg / kg 为安全范围, 200 mg / kg 为污染临界点, 超过 300 mg / kg 为严重污染水平<sup>22</sup>。张乃明等 (2006) 在云南斗南镇做的土壤抽样调查发现 10 年及以上大棚表层土壤硝酸盐的平均残留量比露地高 10-17 倍, 达到 1086.2 和 1524.6mg/kg。研究结论表明随种植时间的不同, 大棚内土壤的硝酸盐含量比露地种植高 1—17 倍 (图 3)<sup>23</sup>。 $NO_3^-$  本身无毒, 但若未被作物充分同化可使其含量迅速增加, 摄入人体后被微生物还原为  $NO_2^-$ , 使血液的载氧能力下降, 诱发高铁血红蛋白血症, 严重时可使人窒息死亡。同时还可以在体内转变成强致癌物质亚硝胺, 诱发各种消化系统癌变, 危害人体健康<sup>24</sup>。

### 氮肥促进土壤酸化

氮肥在土壤中的硝化作用所产生硝酸盐是土壤酸化的主要原因。在江西红壤丘陵所做的试验中, 氯化铵和硫酸铵分别相当于  $60\text{ kg} / \text{hm}^2$  的数量施用, 2 年后表土 pH 值从 5.0 分别降至 4.3 和 4.7。章力建等 (2005) 研究指出, “我国为增产长期偏袒施用氮素化肥, 忽视有机肥施用, 加速了土壤有机质的矿化与损失, 恶化了土壤的物理性状, 造成了土壤板结, 退化、酸化, 特别是长期使用酸性氮肥, 已使我国局部地区, 如广州、皖南、贵州等地 3 年内土壤 pH 值下降 0.4~0.8。” “长期盲目滥用化肥破坏了土壤的结构, 我国耕地有机质含量已降到 1.5%, 明显低于欧美国家耕地有机质含量 2.5% 到 4.5% 的水平。<sup>25</sup>”

对土壤酸化后的危害学者进行了研究, 于文涛等 (2006) 在研究中指出, 酸性土壤滋生真菌, 根际病害增加, 且控制困难。尤其是十字花科的根肿病和茄果类蔬菜的青枯病、黄萎病增多; 加州大学伯克利分校环境科学、政策和管理学院, 昆虫生物学部的两位研究人员 Miguel A. Altieri 和 Clara I. Nicholls 在 2002 年的一篇文章中梳理了至二十世纪五十年代以来对土壤肥力与虫害关系的研究, 发现植物生长在有机质丰富、土著微生物活性高的土壤中表现出对部分虫害高的耐受力, 部分虫口密度也比使用化学氮肥的作物低<sup>26</sup>。由此推论, 作物过量使用化肥就会导致杀虫剂的使用量加大; 土壤结构被破坏, 有机质含量下降, 土壤板结, 物理性变差, 抗逆能力下降, 蔬菜抵御旱、涝自然灾害的能力减弱; 在酸性条件下, 铝、锰的溶解度增大, 有效性提高, 对蔬菜产生毒害作用; 酸性条件下, 土

壤中的氢离子增多,对蔬菜吸收其它阳离子产生拮抗作用<sup>27</sup>。国务院发展研究中心国际技术经济研究所《我国农业污染的现状分析及应对建议》黄皮书指出,“我国东北地区一些农场长期使用氮肥,土壤有机质含量已由原来的 5%-8%降到 1%-2%。”

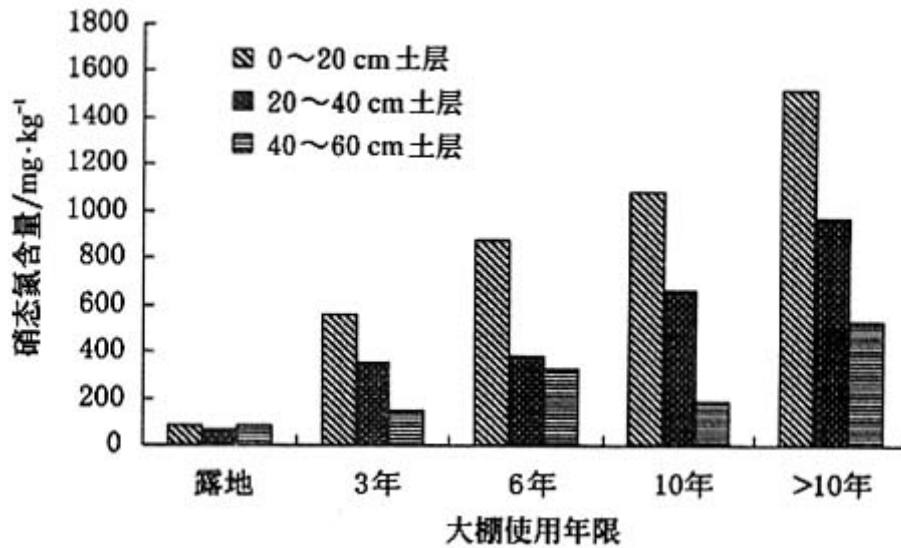


图 3. 不同年限大棚土壤硝态氮的含量<sup>28</sup>

## 2.3 对长期粮食安全的威胁

### (1) 气候变化威胁粮食安全

大量使用氮肥不断排放出大量的温室气体,使气候变化加剧。而气候变化则通过各种方式对农业带来负面影响,威胁长期粮食安全。

气候变化早以成为全球性问题,其影响广泛而深刻。2001 年中英双方的科学家组建项目组,联合开展了气候变化对中国农业的影响的研究,逐渐认识到气温变暖对农业生产造成的正、负效应。2008 年环保组织绿色和平发布了由中国气候变化专家委员会委员、中国农业科学院研究员林而达领衔的研究团队的《气候变化与中国粮食安全》研究报告,其中指出“气候变化主要通过温度、水资源、极端天气事件、土壤、病虫害等因素影响农业生产,并因区域和季节而异。总体而



言，气候变化对我国农业的影响利弊并存，但以负面影响为主。气候变化将造成我国未来粮食生产波动增大，甚至对我国的粮食安全构成威胁。”本报告将援引中英“气候变化对中国农业的影响”项目组和《气候变化与中国粮食安全》研究报告来说明过量施用氮肥对长期粮食安全造成的威胁。

“气候变化对中国农业的影响”（ICCCA）项目组<sup>①</sup>第一阶段的研究结果表明，在未来的排放情景下，到21世纪末，中国的年平均气温可能上升3—4°C，年降水量可能提高10-13%。在不考虑CO<sub>2</sub>肥效的情况下，这将对我国主要粮食作物产生重大影响，在未来20—80年间，水稻、玉米、小麦的减产幅度可达37%。如果只考虑气候变化，未来人均粮食供给量将显著下降，在未来近期内下降到低于基本的口粮需求（300公斤/人/年）。如果考虑CO<sub>2</sub>肥效作用，人均粮食占有量也将下降，但可以满足人均基本的口粮需求，考虑了技术进步后，下降趋势有所缓解<sup>29</sup>。

《气候变化与中国粮食安全》研究指出，气候变化主要表现为温度升高。在北方地区，温度升高将加剧水资源短缺，沙漠化趋势进一步恶化。在长江中下游地区，强降水事件频率将有所增加，洪涝灾害严重农业用水减少和耕地面积下降，会使中国2050年的粮食总生产水平与2000年的5亿吨粮食生产水平相比下降14%~23%；气候变化还导致土壤微生物活性提高，加速土壤中有机质和氮的流失，从而加速土壤退化、侵蚀、盐渍化的发展，削弱农业生态系统抵御自然灾害的能力；气候变化带来环境变化将加剧病虫害的流行和杂草的蔓延，因此为了减少气候变化对农业的负面影响，农药、化肥的施用量和灌溉用水量均相应增大，加上进行土壤改良和水土保持的费用也在增大，都使农业的投资增加，提高了农业生产成本<sup>30</sup>。

从以上的研究可以看出，气候变化对长期粮食安全产生负面影响，而氮肥过量使用排放的温室气体加剧了气候变化。

---

<sup>①</sup>英国首相托尼布莱尔，在1997年6月里约地球峰会+5的报告中强调了全球气候变暖问题，并声明发达国家必须和发展中国家一起应对气候变化。为了承担减排义务，英国环境食品与乡村事务部和中国科技部在2001年7月6号签署了气候变化研究合作计划声明。项目受到英国环境食品与乡村事物部和英国国际发展部的资助，英国IEA技术公司对该项目进行管理，英国驻中国大使馆和英国国际发展部驻北京办公室协助他们完成工作。中方的主要参与者为中国农业科学院。<http://www.china-climate-adapt.org/ch/index.php>

## (2) 土质下降和土壤环境恶化对粮食安全的威胁

氮肥过量使用导致土质下降和土壤环境恶化的主要原因是氮肥的使用导致土壤重金属污染和土壤酸化改变土壤理化性质，进而影响到作物的生长。

我国受镉、砷、铬、铅等重金属污染的耕地面积近 2000 万  $\text{hm}^2$ ，约占我国耕地总面积的 1/5，致使 10% 的耕地基本丧失生产力，每年造成粮食减产 1000 多万 t，18.5% 左右的农产品重金属含量超过我国食物卫生限量标准。

土质下降和土壤环境恶化对长期粮食安全威胁的详细分析可参见本研究 2.2 (3) 部分。

## 2.4 过量施用氮肥对食品安全的威胁

过量施用氮肥对食品安全造成威胁的主要途径为：氮肥带入重金属污染土壤、氮肥导致作物亚硝酸盐富集和农药残留，这些有害物质可通过食物链在人体富集，进而对人体产生影响。

国务院发展研究中心国际技术经济研究所《我国农业污染的现状分析及应对建议》黄皮书指出“2005 年 4 月，农业部组织有关质检机构对我国 37 个城市蔬菜农药残留状况的监测结果：52 种蔬菜 3845 个样品中，农药残留超标样品 318 个，超标率为 8.3%。频繁过量施用氮肥，导致蔬菜中硝酸盐含量严重超标，某些磷肥含氟、镉和砷等有害物质，增加了蔬菜、粮食中氟和重金属含量。北京市农委资料显示，北京市市场(含超级市场)的叶菜类蔬 60-70% 硝酸盐含量超标，果菜类蔬菜 20-30% 硝酸盐含量超标，菠菜硝酸盐含量高达 2358mg/kg，萝卜达 2177mg/kg，大白菜达 3225mg/kg，北京市民砷日摄入量已是世界卫生组织规定标准的 120%。”

中国农业科学院依据联合国粮农组织和世界卫生组织对食品硝酸盐摄入量的规定，提出了蔬菜卫生的评价标准：第一，蔬菜中硝酸盐含量低于 432mg/kg，允许

生食；第二，硝酸盐含量为 432-785mg/kg，蔬菜不宜生食；第三，硝酸盐含量为 785—1440mg/kg，生食和盐渍均不宜；第四，硝酸盐含量为 1440-3100mg/kg，蔬菜不允许熟食。仅以蔬菜中硝酸盐含量超过 432mg/kg 为生食不宜的标准衡量，上海市近期一项对蔬菜的检测发现，大棚内叶类蔬菜硝酸盐超标率高达 51.5%，茄果类超标为 15.6%，而大田叶菜类硝酸盐超标率为 20.5%，茄果类则未检出。大棚内叶菜超标样品平均含量比大田叶菜高出 29%，最高含量高出近 1 倍，而且大棚内部分蔬菜硝酸盐超标已超过盐渍不宜的标准。

硝酸盐可在胃内被细菌的还原酶转变成亚硝酸盐，再与胺结合成致癌的亚硝胺。用硝酸盐含量高的水冲泡婴儿奶，可能为导致婴儿的“蓝婴症”（高铁血红蛋白症），这是因为硝酸盐在胃酸环境下生成亚硝酸，会和血红素结合，大大降低了血红素的携带氧气的功能，造成婴儿的全身缺氧而呈现肤色发蓝紫<sup>①</sup>。此外，胃癌和食道癌都已经过病理学证明与硝酸盐有关。

另一方面，过量施用氮肥还在一定程度上导致农药施用量的增加，而农药残留对人体健康的威胁巨大。国内对化肥与农药使用量之间的关系，即对使用化肥对农田生态系统的改变是否影响到农田虫口密度的相关研究极少。国外对此问题的研究表明过量使用农业化学品和单一种植模式加重了虫害问题（Conway and Pretty, 1991）<sup>31</sup>；化学品的使用打破了土壤营养平衡，降低了作物对害虫的耐受力（Magdoff and van Es, 2000）<sup>32</sup>（Altieri and Nicholls, 2003）<sup>33</sup>；Adkisson(1958)报告指出使用化肥的棉花附着的棉子象鼻虫是不用化肥的 3 倍，是因为改良后的土壤延长了作物的生长期，导致结果期比常规农业种植的棉花延迟<sup>34</sup>；Klostermeyer (1950)报告指出氮肥使得甜玉米的苞叶增长过快、过紧，影响了玉米螟蛉了侵扰程度<sup>35</sup>；Meyer (2000)的研究指出土壤养分的有效性不仅影响作物遭受虫害侵扰时的损失量，还影响到作物的恢复程度<sup>36</sup>；Barker(1975)发现，土壤肥力还可通过改变作物的养分来影响作物对害虫的耐受力，在等量氮素的前提下分别施用氮肥和有机肥，菠菜叶子  $NO_3 - N$  的含量前者比后者高；以上国外学者的研究表明有机耕作的蔬菜的叶子  $NO_3 - N$  含量低，而这正是提高蔬菜对害虫耐受力的关键因素。相反，常规化学农业由于作物本身对虫害耐受力差，因此需要多

<sup>①</sup> 资料来源：<http://baike.baidu.com/view/1399232.html>

施农药，导致食品安全进一步恶化。

## 3. 氮肥行业的补贴

### 3.1 氮肥行业直接补贴

氮肥对国家粮食安全的重要性不言而喻，并且氮肥企业多是地方的纳税大户，因此氮肥行业的发展获得各级政府的支持和财政补贴，涉及上游的原材料价格优惠、生产环节中的税收优惠和环保投资优惠、下游的运输价格优惠和销售环节税费的优惠（表格 7）。《关于深化化肥流通体制改革的通知》（国发[1998]39 号）规定“有关部门应优先保证、均衡供应化肥生产所需石油、天然气、煤炭、矿石、电力等原原材料及能源；铁路、交通、港口等单位应优先保证化肥及其原料的运输。并对有经营资格的单位调运农用化肥和磷矿石实行优惠运价。对化肥生产、经营和国内短缺品种继续实行税收优惠政策。”

有研究指出，仅免收增值税一项就相当于每吨尿素获得 56 元左右的补贴收入<sup>37</sup>；2006 年时任国家发展和改革委员会副主任毕井泉指出，国家的免税、优惠运价，优惠电价、优惠气价等对化肥生产和流通环节进行的补贴政策措施，相当于每年对化肥生产流通环节补贴 170 亿元，尿素平均每吨补贴 160 元左右<sup>①</sup>；发改委提供数据显示，化肥生产用电平均每千瓦时 0.33 元，比其他工业用电低 0.15 元，年降低化肥生产成本 80 亿元；化肥铁路运输价格每吨公里 2.43 分，比其他化工产品低 6.18 分，全年可降低化肥流通成本 61.9 亿元<sup>②</sup>。依照上述数据，以年生产尿素 4000 万吨估算，当年氮肥行业可获得补贴和税收优惠约有 200 亿元。

---

<sup>①</sup> 资料来源：<http://politics.people.com.cn/GB/1027/4214187.html>

<sup>②</sup> 资料来源：<http://www.sjzjz.heagri.gov.cn/default3.aspx?id=45831>

表格 7. 化肥行业补贴形式分类统计表<sup>38</sup>

时间	补贴形式	补贴内容	部门
2003/12/21	电价补贴	价格优惠 0.1 元/度	发改委
2003/12/16	运价补贴	运价相当于同类化工品的 30%左右	发改委、铁道部
2004/4/5	价格补贴	生产企业的磷酸二铵销售量 and 进口企业磷酸二铵进口量每吨补贴 100 元，补贴资金由中央财政负担。	财政部
2005/1/12	利息补贴	淡储化肥贴息成本由委托单位参照国家规定的尿素中准出厂价或其他品种市场价格情况和合理运杂费用逐年确定。承储企业，按标的量确认淡储数量，给予利息补贴；	发改委、财政部
2004/2/27	价格干预	要求各地适时对未列入定价目录的国产化肥出厂价格、进口化肥港口交货价格和化肥批发、零售价格采取干预措施，保持价格稳定。	发改委
2004/2/28		中央进口化肥的综合经营差率由 1.7% 下调到 1.2%，对磷酸二铵、复合肥等品种价格允许上浮的幅度由 3% 改为 0，并要求各地相应从严控制地方进口化肥价格。	发改委
2001/7/20	增值税	对生产销售的尿素统一征收增值税，并在 2001、2002 实行增值税先增后退的政策。2001 年对征收的税款全部退还。2002 年退还 50%，自 2003 年起停止退还政策。	财政部、税务总局
2004/1/2		恢复对尿素产品增值税先征后返 50% 的政策	财政部、税务总局
2005/7/1		暂免征收增值税	财政部、税务总局

### 3.2 氮肥行业的间接补贴

氮肥行业的间接补贴主要指国家财政支农支出中与化肥有关的补贴。

国家财政支农资金逐年增加，由 1978 年的 150.66 亿元增加到 2005 年的 2450.31 亿元，增加了 16.26 倍。对农业和农民的直补范围包括：主要农产品风险金；对主产区农业使用先进技术和优良品种等进行补贴；对于特定农产品价格补贴与化肥、农药、种子等非特定农产品补贴实行捆绑作业，按农民出售农产

品的数量直接进行补贴；扩大良种补贴，并向主要农产品倾斜；增加退耕还林、退木还草、小流域治理等生态环境的保护性补贴；加大农业机械更新、动物疫病防治等农业生产性补贴；对农民购买农业柴油、农用电、农药、化肥、农膜等农业生产资料适当给予补贴；完善主要粮食品种的最低收购价制度，建立农产品反周期补贴制度等。2006年中央财政共安排125亿元，对种粮农民柴油、化肥等农业生产资料预计增支实行综合算账。新增农业生产资料增支综合直补后，国家对种粮农民的直接补贴总额达到了267亿元，比2005年增长102%。

### 3.3 氮肥行业补贴的负面影响

中央财政支农资金在调动农民种粮积极性和促进农民增收上发挥了重要作用，但是也必须意识到财政支农补贴对农户化肥投入量的影响。

吕耀，王兆阳在2000年的一篇文章《农业低价资源政策评价》中指出，几年来农业低价资源政策的实施，一方面极大改善了农产品供求关系，促使农业产出大幅度增加，但另一方面，农业资源集约化高投入也导致资源严重浪费、环境污染等一系列问题。“对化肥的补贴降低了其市场价格，这样就产生了化肥的社会成本和私人生产成本(名义化肥价格)之间的差异。”黄季焜的研究表明每公斤农作物产品生产成本中的化肥农药费用水平我国是世界上最高的国家之一。在每公斤小麦、玉米、油菜籽和棉花生产成本中，我国的化肥农药费用都高于美国、加拿大和法国(表格8, 图4)。1998-2006年，我国氮肥成本占每亩主产品出售产值平均约为17%。可见，减少氮肥使用能够带来农民增收。

财政给氮肥行业的补贴也不尽合理。“我国乡以上的小化肥企业星罗棋布。仅以合成氨生产企业为例。生产合成氨的企业近1000家，平均生产规模2万多吨，合成氨年生产能力30万吨以上的大型企业只有26家，合成氨年生产能力6万吨以上的中型企业也不足100家。其他800多家小氮肥厂合成氨平均生产规模只有2万吨，这800多家小氮肥厂的产量约占氮肥总量的60%。反观其他国家的情况。俄罗斯约有35家氮肥厂，合成氨平均规模约为40万吨，美国生产合成氨的企业

只有 50 多家，平均规模 30 多万吨。<sup>39</sup>” “据中国氮肥工业协会统计，尿素生产成本中电价约占 25%，燃料约占 70%。电力、燃料等实行优惠价格，使那些规模小、技术水平低、耗能大的小化肥企业也能得已生存。”

表格 8. 1997-98 年稻谷、小麦、玉米、大豆、油菜和棉花生产成本水平的国际比较<sup>40</sup>

作物	国家	每公斤产品产出投入的生产成本							单位产品
		化肥农药	机械	土地	活劳动	税收	成本外	其它	生产成本
小麦	中国	0.29	0.21	0.03	0.46	0.05	0.08	0.18	1.31
	美国	0.22	0.2	0.26	0.07	0.08	0	0.29	1.12
	加拿大	0.2	0.17	0.02	0.06	0	0	0.12	0.56
	法国	0.04	0.05	0.04	0.06	0	0	0.12	0.35
	阿根廷	-	-	-	-	-	-	-	0.91
玉米	中国	0.22	0.09	0.01	0.43	0.03	0.06	0.1	0.94
	美国	0.18	0.26	0.21	0.08	0.02	0	0.14	0.88
	法国	0.04	0.07	0.03	0.07	0	0	0.16	0.45
	阿根廷	-	-	-	-	-	-	-	0.79
大豆	中国	0.22	0.2	0.04	0.93	0.1	0.2	0.32	2.03
	美国	0.25	0.48	0.55	0.14	0.05	0	0.3	1.76
	阿根廷	-	-	-	-	-	-	-	1.51
油菜籽	中国	0.52	0.17	0.03	1.52	0.14	0.2	0.22	2.81
	加拿大	0.38	0.26	0.03	0.08	0.06	0	0.11	0.92
长绒棉	中国	4.09	1.98	0.42	2.96	0.28	0.99	3.39	14.11
	美国	2.96	4.71	1.61	1.88	0.4	0	1.75	13.45
籼稻	中国	0.16	0.09	0.01	0.43	0.05	0.1	0.16	1.01
	泰国	0.17	0.14	0	0.22	0	0	0.06	0.59
粳稻	中国	0.23	0.18	0.05	0.41	0.05	0.08	0.15	1.14
	美国	0.35	0.53	0.39	0.18	0.1	0	0.49	2.04

注：成本外支出包括村提留费、乡统筹费、两工支出和其它成本外支出。

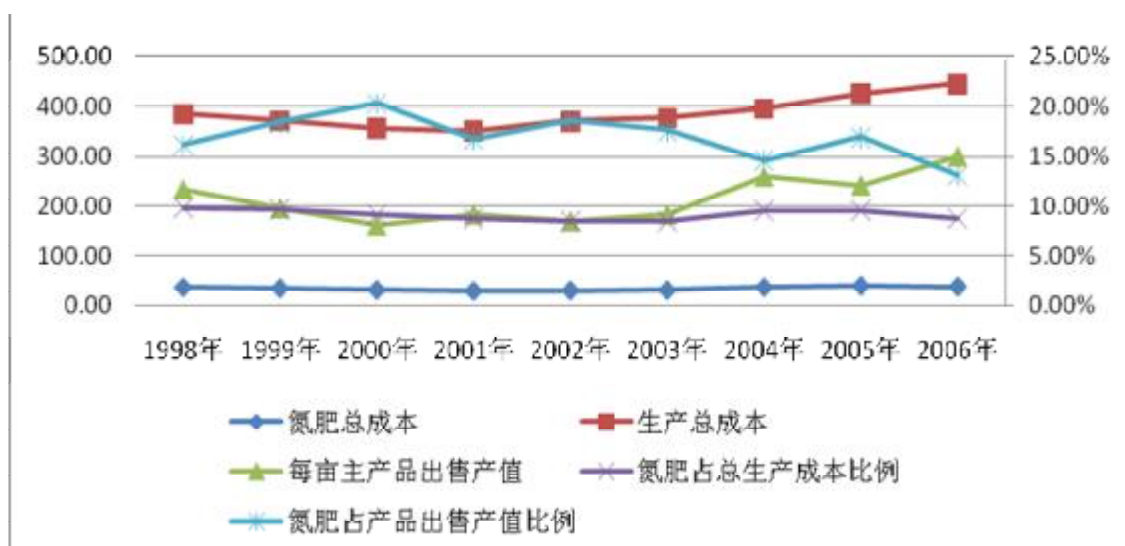


图 4. 亩均氮肥成本、生产总成本、主产品产值及成本收益占比 单位：元/亩，<sup>41</sup>

注：氮肥中不包括二氨

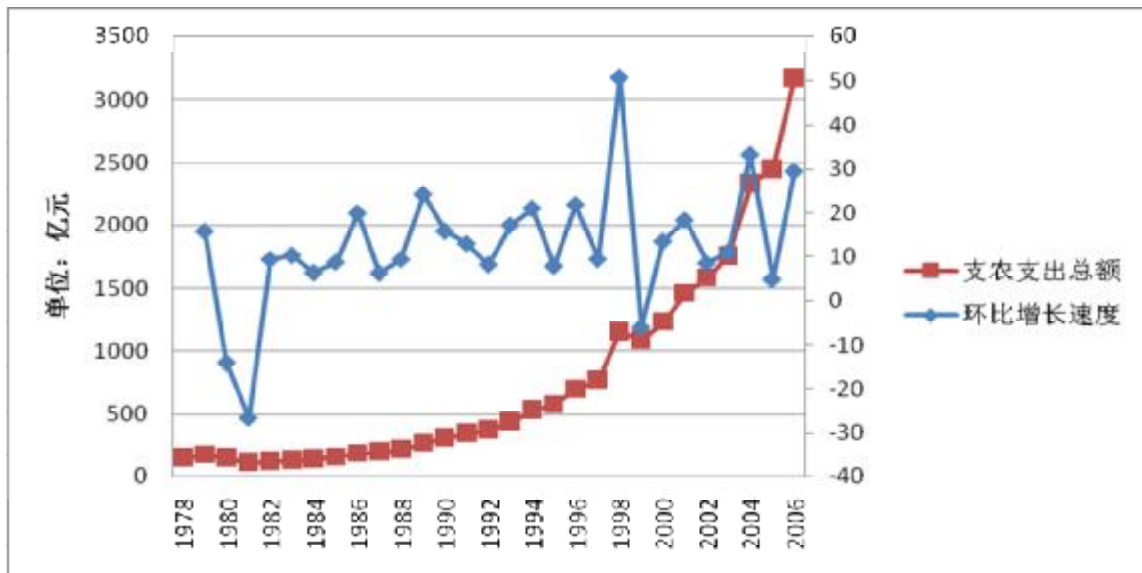


图 5. 各年支农支出总额和支出环比增长速度<sup>42</sup>

## 4. 国内外治理农业污染政策述评

现任中国农业科学院农业资源与农业区划研究所副所长张维里带领课题组研究国外治理农业面源污染时发现，欧美的发达国家普遍经历了严重的农业面源污染和治理过程。这些国家的农业面源污染研究人员总结经验时提到：对点源污染和面源污染的监测和控制需要截然不同的技术和对策<sup>43</sup>。

对点源污染主要通过兴建污水处理工程进行末端控制。经过 20 多年的不断发展，进行末端控制的污水处理技术和监测技术已经比较成熟和规范，欧美主要国家政府部门的相关网站均可检索到相应的技术标准。对面源污染，国际范围内仍然缺少有效的控制和监测技术，在控制上采用源头控制策略，强调在全流域范围内通过农田最佳养分管理等农业措施削减氮、磷总量，在监测上则强调因地制宜，而没有标准的方法<sup>44</sup>。

张维里（2004）认为面源污染的发生主要受降雨影响，具有间歇性，其强度受发生地点的土壤类型、土地利用类型和地形条件的影响，具有显著的地点特征



(site-specific)。这些特性决定了第一，对面源污染的监测和其在水体污染中贡献率的客观评价十分困难，因而，至今在国际范围内尚无成熟和标准化的控制技术和监测技术。第二，末端治理技术很难有效地控制面源污染。在旱季，很少有农田和场地径流，这一期间开动污水处理设施只能空耗设备运行费。而在雨季，一场大雨，产生大量径流，流量在短时间内剧增，往往又超出污水处理厂的设计负荷，需要启动泻洪道，难于进行有效的污水处理。以滇池、太湖流域和上海黄浦江水源保护区为例，当日降雨量 50 mm 时，对流域农田产生径流进行末端治理分别需要日处理能力百万吨级的污水处理厂 78、1 000 和 32 座，日处理费用分别为 4 000 万元、5 亿元和 1 500 万元。由于末端控制在面源污染治理上不现实，对面源污染应当采用源头控制的对策。

张维里（2004）的研究还发现，操作简单、价格便宜的替代技术是欧美发达国家农业面源污染控制的关键。目前发达国家对农田面源污染的主要控制技术有：(1)农田最佳养分管理；(2)有机农业或综合农业管理模式；(3)等高线条带种植；(4)农业水土保持技术措施；(5)控制有机肥的施肥量(低于 170 公斤 N / 公顷)。比较之下，一些价格较贵的尖端性农业生产技术，包括缓控释肥料技术、微生物肥料技术，至今没有成为农业面源污染控制的主流技术。这些替代技术在治理工作中发挥了巨大的作用，如德国，氮、磷化肥用量由  $180 \text{ kgN} \cdot \text{ha}^{-1}$  降至  $110 \text{ kgN} \cdot \text{ha}^{-1}$ ，法国由  $148 \text{ kgN} \cdot \text{ha}^{-1}$  降至  $125 \text{ kgN} \cdot \text{ha}^{-1}$ ，荷兰由  $600 \text{ kgN} \cdot \text{ha}^{-1}$  降至  $330 \text{ kgN} \cdot \text{ha}^{-1}$ 。80 年代末以来，在耕地面积和化肥投入量不断下降的条件下，耕地产出率和作物产量逐年上升，粮食总产和单产分别增加了 57% 和 80%，有关部门对农产品和农业环境的监测结果显示，各类农产品和生态系统中的农药残留、农用化学品残留已大幅度下降，农产品品质明显提高<sup>45</sup>。

国内目前防治农业面源污染的主流思路是末端控制。自“九五”以来，中国中央与地方政府在治污上投入了大量财力，“十五”期间国家用于环境整治的财政预算为 7000 亿元，占 GDP 的 1%。其中 2700 亿元用于水污染的治理<sup>①</sup>。这些投资主要用于污水处理厂及其配套工程建设。但对农业面源污染源头的控制行动计

<sup>①</sup>资料来源：国家环境保护总局（2001）《国家环境保护“十五”计划》。  
[http://www.setc.gov.cn/zyjy/setc\\_zyjy\\_main0013.htm](http://www.setc.gov.cn/zyjy/setc_zyjy_main0013.htm)

划投资甚少。以太湖为例，截至 2005 年，太湖一期综合治理落下帷幕，这次治理历时 15 年，总投资约 100 亿人民币，主要用于引排防洪工程的修建，而非农业污染的治理。而 2007 年至 2020 年的太湖二期综合治理方案计划投资达 1114.98 亿元，却只有 8.86% 用于农业面源污染的治理。2009 年 10 月 28 日，审计署公布《“三河三湖”水污染防治绩效审计调查结果》指出，“三河三湖”水污染防治虽有一定收效，但目前整体水质仍然较差。其中，淮河、辽河为中度污染；海河 49.2% 的断面水质为劣 V 类；巢湖平均水质为 V 类；太湖平均水质为劣 V 类；滇池平均水质为劣 V 类<sup>①</sup>。

生态农业作为治理农业面源污染的方案曾进入决策层的视线，如 2001 年 3 月中央人口资源环境工作座谈会针对农业面源污染的严峻形式，强调“积极发展生态农业、有机农业，保证农产品安全。”<sup>②</sup> 2001 年农业部举办了纪念“6.5”世界环境日座谈会，会议主题是“积极发展生态农业，努力防治面源污染”。农业部副部长张宝文在会议上讲话指出，“生态农业是实现农业可持续发展的必然选择，”“特有的基本国情决定了我国农业必须采用资源高效利用和生态环境保护协调发展的模式。”强调“各级农业部门要把治理农业面源污染提到议事日程，树立“发展生态农业，防治面源污染”的长期思想。<sup>46</sup>”但是，近年来，生态农业在中国的发展却一直不尽如人意。

不少专家学者也提到了生态农业治理思路和方案。朱兆良（1998）年提出使用更多的有机肥减少氮肥污染的关键；朱万斌（2007）认为中国生态农业是具有中国特色的可持续农业，因充分利用废弃物、综合效益提高、减施化肥和农药等特征，而具备实现面源污染减排的功能。

“三河三湖”污染治理效果差的事实说明农业污染不可采取末端治理，生态农业才是中国解决面源污染减排和农业可持续发展的最重要途径。

---

<sup>①</sup> 资料来源：中华人民共和国审计署（2009）《“三河三湖”水污染防治绩效审计调查结果》（二〇〇九年十月二十八日公告）。[http://www.gov.cn/zwgk/2009-10/28/content\\_1450683.htm](http://www.gov.cn/zwgk/2009-10/28/content_1450683.htm)

<sup>②</sup> 资料来源：<http://people.com.cn/GB/shizheng/16/20020310/683716.html>

## 5. 生态农业的氮肥减量效应

我国长期的农业生产实践逐渐形成了符合当地生态环境的生态农业模式，著名的模式有“桑基鱼塘”、稻—草—鸭（鱼）、以沼气池为纽带的“四位一体”等<sup>47</sup>。实践证明，很多生态农业模式都具有明显的氮肥减量效果。

学者（朱万斌等，2007）总结中国生态农业模式的优势主要表现在：第一，中国生态农业特别重视地力维持，也就是注重提高土壤的养分供应能力和维护土壤健康。最重要的渠道就是利用(腐熟的)有机肥。腐熟的有机肥能够改善土壤结构，提高土壤供肥能力，优化肥料代谢与转化的微环境，使得土壤养分的利用效率显著提高，氮肥使用需求量和有害物质产量显著降低。第二，中国生态农业非常重视物质循环利用。农田废弃物和畜禽养殖废弃物被合理利用之后，不仅不会形成污染，还能够优化生产系统，提高生产效率。第三，中国生态农业强调提高农业生态系统的多样性，通过禾豆间作，不仅可以提高肥效，还可以减少病虫害；另外多样性的增加有利于生物防治和有害生物综合治理(IPM)。第四，中国生态农业利用系统多因子偶合，能显著(有时是数倍)地提高生产综合效益，促进农民增收、增强农业和农村自我发展能力<sup>48</sup>。

本研究引述胡振鹏等（2006）对江西省“猪-沼-果”生态农业实践的研究和居辉（2008）对生态农业与气候变化的研究来说明生态农业具有替代氮肥，保障长期粮食安全及促进农民增收的具体优势。

“猪一沼一果”模式（图 6）属于以农户为单元的小型循环经济，具有强大的生命力、良好的效益和广泛的适应能力，容易和其他系统耦合，并占有优势地位。胡振鹏教授通过大量的调查和对比实验，揭示了该生态农业模式在能源、营养物质和环境保护方面的高效性和经济可行性。对照组用尿素或复合肥，每株每次 20kg；厩肥 2 次，每次 20kg。实验组用沼液 5 次，每株每次 25kg；沼渣 2 次，每次 20kg。（表格 9、10）实验结果表明，给果树施用沼液和沼渣不仅产量增加，口感提升，还显著减少氮肥使用量。

居辉等（2008）在《生态农业与气候变化》的研究结论指出生态农业合理利用自

然资源，因地制宜建立多样化生产模式；通过改善农田生态系统结构，增强系统功能来增强生态农业对气候变化的适应能力。该研究分析稻鸭共作生态农业模式指出，“稻鸭共作的立体种养殖复合生态系统具有多重生态学功能，包括具有除草、除虫、防病、中耕浑水、施肥、改善水稻植株群体环境、刺激水稻生长等方面作用。”稻鸭工作模式显著减少稻田氮肥使用量和 $CH_4$ 气体的排放。

表格 9. 沼气示范工程对比实验结果<sup>19</sup>

实验项目	规模	实验内容	成效对比
沼液养猪	每户 1 头	实验组每日按沼液/饲料=1/20-1/3 喂养；对照组加同样比例的清水；其他条件基本相同	食欲好、毛色光亮、喜静爱睡。平均日增重增加 10.2%，缩短饲养周期 11d，每头节省饲料 34.6kg。
沼肥种果	每户 667 m <sup>2</sup>	全年施肥 5 次。对照组用尿素或复合肥，每株每次 20kg；厩肥 2 次，每次 20kg。实验组用沼液 5 次，每株每次 25kg；沼渣 2 次，每次 20kg。	单位面积坐果率提高 1.2%、产量增加 22.7%，成熟早、果色油光发亮，口感好，含糖量高。
沼肥种菜	每户 67 m <sup>2</sup>	对照组 1000 kg 厩肥作基肥，50%人粪尿 600~800kg 追肥 4 次。实验组用 1 000 kg 沼渣作基肥，50%-100%浓度 61n800kg 沼液追肥 4 次。	平均单产增加 28.4%，成熟早，蔬菜色绿光亮，病虫害少。
沼肥养鱼	每户 667 m <sup>2</sup>	投放鱼苗前，对照组投 250kg 猪粪，实验组投等量沼渣；以后，每 5d 对照组投放 150kg 人粪尿，实验组投等量沼液。	平均单产增加 25.6%，鱼病少，生长快，鱼的色泽好；塘中浮游生物多，溶解氧丰富。
沼肥植棉	每户 67 m <sup>2</sup>	对照组常规种植。实验组增加沼液拌种、每公顷棉苗营养钵加 15000kg 沼渣，用 50%沼液每公顷 750 kg 叶面施肥两次。	出苗率高，病株少，棉秆高大、茎粗。平均单产增加 20.69%。
沼液水稻浸种	每户 67 m <sup>2</sup>	对照组用清水浸种，实验组用 50%或 25%（因品种而异）沼液浸种 48h。	发芽率提高 2.1%，成秧率提高 4.3%，单产提高 5.2%；发芽整齐，秧苗返青快，抗寒能力强。

表格 10. 沼肥和人畜粪尿营养成分比较(单位: %)<sup>50</sup>

肥料	有机质	腐殖酸	全氮	全磷
沼液			0.03-0.08	0.02-0.06
沼渣	30-50	10-20	0.8-1.5	0.4-0.6
人粪尿	5-10		0.5-0.8	0.2-0.4
猪粪	15		0.56	0.4

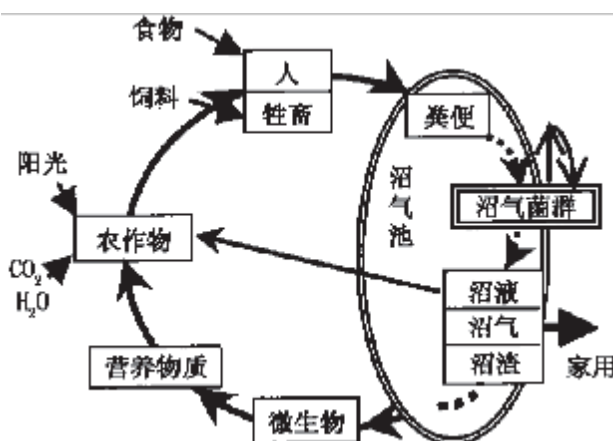


图 6. 猪-沼-果生态农业模式<sup>51</sup>

## 6. 支持生态农业的政策述评

欧美发达国家曾经试图通过征收污染税的办法来控制农业污染物总量的排放,但是发现难以计量和监测污染物,因此不得不都在执行两三年后取消污染税,转而制定鼓励生态农业发展的政策,如德国撒克森州从多年前即规定:农民从事氮肥用量减少 20%~50%的生态农业模式或综合农业模式的经营,每公顷可得到 80~1500 马克的补贴,这笔资助主要用于进行土壤矿质氮的分析,少用或不用农药、采用的一定轮作类型的耗工(表格 11)。

表格 11. 德国撒克森州对有利环境农业的优惠政策<sup>52</sup>

	优惠类型	资助额 (DM/ha)	所需条件
1a	综合农业援助	80	病虫害防治根据预测模型,氮肥施用按照撒克森州农业咨询项目规定
1b	无环境污染措施援助	120-240	在履行 1a 的规定的的基础上氮肥用量至少减少 20%。不用生长刺激素,不用农药

1c	改善土壤的措施援助	80-130	在履行 1a 规定的基础上采用间作以避免冬季农田裸露。播种时采用地表覆盖等其它措施
2	控制性的综合农业（蔬菜种植）	500	按照德国联邦政府对综合农业蔬菜种植的各项规定
2	控制性的综合农业（果树种植）	900	按照撒克森州政府对综合农业果树种植的各项规定
2	控制性的综合农业（酿葡萄酒用葡萄种植）	900	按照撒克森州政府对综合农业葡萄酒用葡萄种植的各项规定
2	生态农业（一般农田）	450-550	加入国家认可的生态农业协会，并履行协会的各项规定
2	生态农业（蔬菜种植）	700-800	加入国家认可的生态农业协会，并履行生态农业协会关于蔬菜种植的各项规定
2	生态农业（果树及葡萄种植）	1300-1500	加入国家认可的生态农业协会，并履行生态农业协会关于果树及葡萄种植的各项规定

在中国，政府已经高度重视农业污染问题，国家对于农业的发展战略也相应转向。2007 年召开的十七大提出“生态文明”理念。2007 年中央一号文件改变 1956 年因国家工业化需求而确立的“农业现代化”指导思想，提出“发展现代农业是建设新农村的首要任务”。其中对农业本体论做出的调整是：“农业不仅具有食品保障功能、而且具有原料供给、就业增收、生态保护、观光休闲、文化传承等功能。建设现代农业，必须注重开发农业的多功能性。”学者（杨帅、温铁军，2008）的研究很快发现 2007 年中央一号文件出台后海外学者就给予了积极回应，评价说中国终于出台了类似欧盟，日本的农业保护政策，为讨论解决农业生产的环境污染问题、向生态可持续性农业转变，提供了难得的契机。同期的世界银行的报告也提出传统农业对于生态环境的正面作用<sup>53</sup>。

学者（杨帅、温铁军，2008）的研究认为，“中国历史上传统的“粮猪型”小农家庭内部化以农业为主的综合生产，农户种田兼养禽畜的同时开展家庭工副业，由于其生产过程与自然合一，本来就是“种养结合”生态化的有机农业模式。”“生态环保农业发展困境在于市场失灵和政府失灵”“世界上迄今未见单靠市场机制就有效地解决现代化农业造成的负外部性问题的先例；”并借鉴日韩台综合农协模式及国内已有的生态农业实践经验，提出建设和推广生态农业循环系统的

试验和建议，包括：“转变以往的补贴方式，不再进行旨在提高农业产业效率的补贴，而改为对从事有机种植技术和实验的研究进行补贴，对采用有机种植的农户进行补贴，以形成恢复农业有机生产的外部激励机制；提高农村的组织化程度，以合作的方式解决有机生产时因内部化了环境负外部性问题而带来的成本，同时依靠合作组织的力量解决社区内部的生态性公共物品的提供问题；同时在城市推动有机食品的消费合作社，一方面提倡在生态文明下的对生态产品的消费认同和消费文化，另一方面减少其他部门在流通环节所过度占有的农产品利润，保护生产者及消费者双方的利益。<sup>54</sup>”其他的学者（胡振鹏等，2006）也提出了类似的补贴农户进行生态农业实践；促进农村经济合作组织建设（朱万斌等，2007）等建议。

综上，20世纪80年代以来，发达国家都对农业生产中过量使用化肥造成的负外部性做出相应的调整，我国政府也在本世纪初对农业政策进行了本体论的重大调整，并提出2020年的农业发展目标是：资源节约型、环境友好型农业。但目前为止仅有一些对常规农业耕作系统简单修复的方法，采取控制化肥过量施用方法，如测土配方施肥，但这种方法的成本很高（见表格12）。而传统生态农业模式中的诸多优点是低成本构建生态农业和环保农村必须挖掘和依靠的。

表格 12. 中国农村劳动力人均耕地、种植效益与土壤化验费用<sup>55</sup>

项目	数据
中国农村劳动力人均耕地（公顷）	0.28
中国发达地区农村劳动力人均耕地（公顷）	<0.13
目前粮食作物纯效益（元/公顷）	1500-2500
目前蔬菜作物纯效益（元/公顷）	15000-75000
土壤分析费用（元/一个土壤样本）	200-300

## 7. 结论

本文选择氮肥为研究对象，一方面由于中国已经从氮肥缺乏的国家转变成为世界上氮肥产量和使用量第一大国，而氮肥的大量使用给农业和整体生态环境带来严重的污染；另一方面，以往给中国粮食增产和农业发展带来促进作用的氮肥

的肥效已经极大程度降低，甚至即将适得其反地开始成为我国长期粮食安全的威胁因素。因此，在当前我国整体生态环境恶化的情况下，不得不计较氮肥给生态环境和社会经济带来的外部成本，反思目前的农业生产方式和农业政策的合理性。

研究的结果表明，农业污染呈现出立体化倾向，形成了包括点源和面源污染在内的水体——土壤——生物——大气各层面直接、复合交叉和循环式的立体污染。由于农业综合立体污染的途径和原理过于复杂，因此目前还没有系统评估经济损失的有效方法，亚洲开发银行估计我国农业面源污染造成的直接经济损失占全国 GDP 的 0.5%—1%之间<sup>56</sup>；过量施肥和施用农药还降低了我国农产品在国际市场的竞争力，农产品出口贸易及农民增收受到阻碍，据联合国的统计，我国每年约有包括农产品在内的 74 亿美元出口商品因绿色壁垒而受阻<sup>57</sup>；化肥和农药的过量使用还导致成本不必要的增加，而且农药残留使农产品质量下降，同时农民收入减少，农田净收益减少 10.30%<sup>58</sup>。

欧美发达国家普遍经历的因过量化学投入品引发的农业面源污染，总结发达国家治理农业面源污染的经验可以看出，欧美发达国家普遍采用简单的、易于被农业生产者接受和操作的、成本低的对环境友好的方式，并在政策上激励生产者采用这些方式。治理农业面源污染的方式与治理点源污染的方式不同，宜采取源头治理，而不是末端治理。目前我国的治理方式主要为末端治理，治理成本高而且效果不理想。

中国生态农业实现传统农耕文明和现代科技的结合，不仅可以有效地替代氮肥，还有利于长期粮食安全和农民增收。因此，中国应该因地制宜地发展生态农业，确立以生态农业为主防治农业立体污染的思路。

## 8. 政策建议

2010 年是我国实施“十一五”规划的最后一年，“十一五”规划中强调提高农业综合生产能力、加强农村环境保护、降低能源和资源消耗以及生物质能开发利用等，这些都与本文所探讨的氮肥问题息息相关。2010 年更是总结“十一五”



规划的经验，编制起草“十二五”规划的重要一年。因此，本文对目前国内氮肥的生产使用现状分析、相关农业污染问题分析，以及国内外支持生态农业发展的政策的评述，进行了进一步探讨和分析。

我国现仍面临农村环境、面源污染进一步恶化，能源和资源消耗严重等问题，为了更好地体现中央发展现代农业的思路，为“十二五”规划解决农村环境、面源污染，节能减排等工作建言，特提出如下几点政策建议：

(1) 减少氮肥行业补贴，设定减少总量目标。

虽然氮肥行业面临严重的产能过剩、氮肥过量使用加剧农业综合立体污染，加大了生态农业转型风险，然而氮肥的生产和流通行业仍然得到大量财政补贴和税收优惠。因此，本文建议减少对氮肥生产和流通行业的财政补贴和税收优惠，并设定化肥生产和使用减量目标。研究表明可在维持现有粮食产量水平的前提下将现有氮肥使用量减少 30%-50%，因此可计划争取到 2020 年逐步将氮肥使用量减少 30%以上。

(2) 提高农村组织化程度，走合作型生态农业的道路。

生态农业生产周期长，农业生产领域的比较收益低。并且由于长期化学农业导致土壤和农田生态环境恶化，导致生态农业初期风险大，产量低，转换期长。因此有必要补贴农民的生态农业实践，特别是转型期的农民生态农业实践。（表格 13）建议成立政府主导、各部分参与，以农民利益为主的综合农协，制定相关政策扶持综合农协进入生态农产品的流通领域获取流通利润，通过流通利润来补贴生态农业生产；综合农协提高了农民的组织化，还能够生产环节起到降低成本和相互监督等良性协同效应；利用综合农协进行生态农业技术普及，政府只有和综合农协对接才能真正了解农民对于生态农业技术的需求（合作型生态农业案例参见专栏 1）。

表格 13. 2004 年 A 村生态农业实验区作物产量与大田化学农业比较<sup>59</sup>

作物品种	产量（斤/亩）		成本（元/亩）	
	试验区生态农业	大田化学农业	试验区生态农业	大田化学农业
小麦	650	850	331	281
花生	440	550	90	52
玉米	750	900	85	77

### (3) 提高市民环保消费意识，提高消费者组织化程度

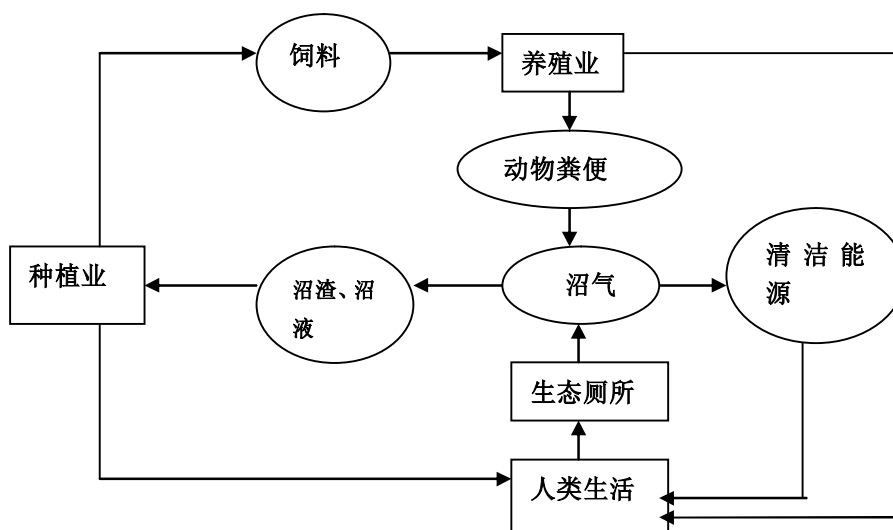
通过环保、食品安全和健康教育提高消费者的环保消费意识，同时在城市组织生态农产品消费者合作社，以此减少流通环节过度占有的农产品利润，保护生产者及消费者双方的利益。

## 专栏 1

### 兰考新农村建设试验区和晏阳初乡村建设学院的合作型生态农业实验

兰考新农村建设试验区成立于 2004 年 9 月，南马庄合作社是试验区下属的一个农民合作社，从事无公害大米的生产和经营。南马庄合作社经过六统一（统一供种、统一购买农资、统一技术服务、统一加工、统一包装、统一品牌销售），以农民自助组织内部相互支持和监督的方式生产，让城市消费者吃到追溯的、健康的无公害大米。市民则组成“购米包地”小组的形式直接团体预定农民种植出的大米。“购米包地”小组逐渐发育成目前的国仁城乡互助合作社，继续从事合作型生态农业实践。

晏阳初乡村建设学院（以下简称学院）正式成立于 2003 年 7 月 19 日。2004 年春天，基于普遍存在的严重的农业污染和食品安全问题，学院正式开始了在校园 26 亩耕地上进行有机农耕的试验工作，希望在技术和宣传教育方面对社会有所贡献，提供另一种思路和可能。



图一、基于清洁能源的村集体“六位一体”循环经济模式

“六位一体”生态农业是学院开展的试验之一。生态厕所、猪舍与沼气池的配合，大大减少了学院能源上对外的依赖。加上厨余有机垃圾之用于堆肥，剩饭剩菜之用于喂猪，沼液沼渣给菜地施肥，自制生物农药。就这样，通过种植、养殖和堆肥的合理配置，一个有效的、半封闭的、集生产生活于一体的小型生态循环系统初步形成。

---

## 参考文献

- <sup>1</sup>孟宪江(2005)《解决农资问题的第三条出路 ——兼谈我国农业生产方式的变革》，2005年5月19日，《经济日报》。
- <sup>2</sup>中国科学院国家科学图书馆，《全球化肥使用存在极大的不平衡》，《科学研究动态监测快报资源环境科学专辑》，2009年7月1日第13期。
- <sup>3</sup>贺帆(2006)《实时实地氮肥管理对水稻产量、品质和氮效率影响的研究》，华中农业大学，博士学位论文，20060601。
- <sup>4</sup>Zhu, Z.-L., D. Norse, and B. Sun, editors. 2006. Policy for reducing non-point pollution from crop production in China. China Environmental Science Press, Beijing.
- <sup>5</sup>Z.L. Zhu, D.L. Chen(2002) Nitrogen fertilizer use in China-Contributions to food production, impacts on the environment and best management strategies. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 63: 117-127, 2002.
- <sup>6</sup>介晓磊, 韩燕来, 谭金芳(1998)《不同肥力和土壤质地条件下麦田氮肥利用率的研究》，《作物学报》，1998, 24 (6) :884 - 888。
- <sup>7</sup>马文奇, 毛达如, 张福锁(1999)《山东省粮食作物施肥状况的评价》，《土壤通报》，1999, 30 (5) :217 - 220。
- <sup>8</sup>朱兆良(2006)《推荐氮肥适宜施用量的方法论刍议》，植物营养与肥料学报 2006, 12(1) : 1 - 4。
- <sup>9</sup>Z.L. Zhu, D.L. Chen(2002) Nitrogen fertilizer use in China-Contributions to food production, impacts on the environment and best management strategies. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 63: 117-127, 2002.
- <sup>10</sup>张维理, 武淑霞, 冀宏杰, Kolbe H(2004)《中国农业面源污染形势估计及控制对策 I.21 世纪初期中国农业面源污染的形势估计》，中国农业科学 2004, 37 (7): 1 008-1 017。
- <sup>11</sup>Z.L. Zhu, D.L. Chen(2002) Nitrogen fertilizer use in China-Contributions to food production, impacts on the environment and best management strategies. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 63: 117-127, 2002.
- <sup>12</sup>汪家铭(2007)《氮肥行业节能减排实施目标与技术创新》，《化肥工业》，第36卷第2期，2009年4月。
- <sup>13</sup>国务院发展研究中心国际技术经济研究所(2006)《我国农业污染的现状分析及应对建议》。
- <sup>14</sup>张维理, 田哲旭, 张宁, 李晓齐. 中国北方农用氮肥造成地下水硝酸盐污染的调查. 植物营养与肥料学报, 1995, 1 (2): 80-87.
- <sup>15</sup>马立珊, 汪祖强, 张水铭, 马杏法, 张桂英(1997)《苏南太湖水系农业面源污染及其控制对策研究》，《环境科学学报》，1997, 17 (1): 39-47。
- <sup>16</sup>刘光栋, 吴文良, 靳乐山(2004)《人力资本法评估农业污染地下水环境价值损失》，《中国环境科学》2004, 24(3): 372~375。
- <sup>17</sup>章力建, 朱立志(2007)《农业立体污染防治是当前环境保护工作的战略需求》，《环境保护》2007/3A。
- <sup>18</sup>朱兆良(中国环境与发展国际合作委员会农业面源污染课题组, 2004)《中国国农业面源污染问题迫在眉睫》，《首届中国生态健康论坛文集》。
- <sup>19</sup>崔玉亭(2000)《化肥与生态环境保护》[M]。北京：化学工业出版社，2000，61。
- <sup>20</sup>崔玉亭(2000)《化肥与生态环境保护》[M]。北京：化学工业出版社，2000，61。
- <sup>21</sup>谢正苗, 李静, 陈建军, 吴卫红(2006)《中国蔬菜地土壤重金属健康风险基准的研究》，《生态毒理学报》，2006, 1(2)。
- <sup>22</sup>王海候, 沈明星, 陆长婴, 张强, 陈凤生, 施林林(2009)《苏州市菜地土壤硝酸盐累积现状与特征分析》，《江苏农业科学》2009年第3期。

- <sup>23</sup>张乃明, 李刚, 苏友波, 毛昆明, 邓玉龙 (2006)《滇池流域大棚土壤硝酸盐累积特征及其对环境的影响》,《农业工程学报》2006, 22(6)。
- <sup>24</sup>肖军, 秦志伟, 赵景波 (2005)《农田土壤化肥污染及对策》,《环境保护科学》, 第 31 卷, 总第 131 期, 2005 年 10 月。
- <sup>25</sup>章力建, 朱立志 (2007)《农业立体污染防治是当前环境保护工作的战略需求》,《环境保护》2007/3A。
- <sup>26</sup> Miguel A. Altieri, Clara I. Nicholls (2003) Soil fertility management and insect pests: harmonizing soil and plant health in agroecosystems. *Soil & Tillage Research* 72(2003)203-211.
- <sup>27</sup>于文涛, 孙召贵, 宋正修 (2006)《蔬菜大棚土壤酸化的原因危害及综合防治技术》,《现代农业》, 2006 (10)。
- <sup>28</sup>张乃明, 李刚, 苏友波, 毛昆明, 邓玉龙 (2006)《滇池流域大棚土壤硝酸盐累积特征及其对环境的影响》,《农业工程学报》2006, 22(6)。
- <sup>29</sup> "气候变化对中国农业的影响"项目组 (2008)《气候对中国农业的影响》, <http://www.china-climate-adapt.org/ch/index.php>
- <sup>30</sup>居辉, 熊伟, 马世铭, 谢立勇 (2008)《气候变化与中国粮食安全》, 北京: 学苑出版社, 2008.10。
- <sup>31</sup> Conway, G.R., Pretty, J., 1991. *Unwelcome Harvest: Agriculture and Pollution*. Earthscan, London.
- <sup>32</sup> Magdoff, F., van Es, H., 2000. *Building Soils for Better Crops*. SARE, Washington, DC.
- <sup>33</sup> Altieri M.A., Nicholls C.I., 2003. Soil fertility management and insect pests: Harmonizing soil and plant health in agroecosystems. *Soil & Tillage Research*. 72: 203-211.
- <sup>34</sup> Adkisson, P.L., 1958. The influence of fertilizer applications on population of *Heliothis zea* and certain insect predators. *J. Econ. Entomol.* 51, 144-149.
- <sup>35</sup> Klostermeyer, E.C., 1950. Effect of soil fertility on corn earworm damage. *J. Econ. Entomol.* 43, 427-429.
- <sup>36</sup> Meyer, G.A., 2000. Interactive effects of soil fertility and herbivory on *Brassica nigra*. *Oikos* 22, 433-441.
- <sup>37</sup>张海霞 (2007),《中国化肥补贴政策改革及其效果研究》, 中国农业大学 硕士学位论文。
- <sup>38</sup>张海霞 (2007),《中国化肥补贴政策改革及其效果研究》, 中国农业大学 硕士学位论文。
- <sup>39</sup>扈映, 侯建军 (2005)《我国化肥行业限价管理政策的经济学分析》,《.价格理论与实践》, 2005(10)。
- <sup>40</sup>资料来源及说明: 中国成本来自《全国农产品成本收益资料汇编》, 其它国家均来自相应国家的农业部和农业研究单位。中国生产成本为 1997 和 1998 年的平均数, 土地费仅为承包费; 美国为 1997 和 1998 年的平均数, 土地包括保险费; 加拿大为 1998 年阿尔伯塔省春小麦成本数据; 法国为 1997 年成本数据, 无税收; 加拿大油菜为 1998 年阿尔伯塔省 *Argentine* 和 *Transgen* 两个油菜品种的平均数; 阿根廷为 1995 年成本数据。中国籼稻和粳稻为 1998 年成本数据, 泰国为 1998 年雨季籼稻成本数据。人民币与外汇换算均按官方汇率计算, 下同。
- <sup>41</sup>国家发展和改革委员会价格司 (2007)《全国农产品成本收益资料汇编》, 中国统计出版社。
- <sup>42</sup>《中国统计年鉴》(2007)。
- <sup>43</sup>张维里, 徐爱国, 冀宏杰 (2004)《中国农业面源污染形势估计及控制对策 III. 中国农业面源污染控制中存在问题分析》,《中国农业科学》2004, 37 (7): 1026-1033。
- <sup>44</sup>张维里, 徐爱国, 冀宏杰 (2004)《中国农业面源污染形势估计及控制对策 III. 中国农业面源污染控制中存在问题分析》,《中国农业科学》2004, 37 (7): 1026-1033。
- <sup>45</sup>张维里, 冀宏杰, Kolbe H, 徐爱国 (2004)《中国农业面源污染形势估计及控制对策\_\_欧美国家农业面源污染状况及控制》, 中国农业科学 2004, 37 (7): 1018-1025。
- <sup>46</sup>张宝文 (2001)《积极发展生态农业努力防治面源污染——在农业部纪念"6.5"世界环境日座谈会上的讲话》,《中国农业科技导报》, 2001 3(5)。
- <sup>47</sup>覃龙华, 王会肖 (2006)《生态农业原理与典型模式》,《安徽农业科学》, 2006, 34 (11): 2484-2486
- <sup>48</sup>朱万斌, 王海滨, 林长松, 程序 (2007)《中国生态农业与面源污染减排》,《中国农学通报》第 23 卷第 10 期 2007 年 10 月。

- 
- <sup>49</sup>杨淳朴, 吴国琛 (1996)《世纪工程——山江湖开发治理》. 南昌: 江西科学技术出版社, 1996.
- <sup>50</sup>胡振鹏, 胡松涛 (2006)《“猪一沼一果”生态农业模式》,《自然资源学报》, 第 21 卷 第 4 期 2006 年 7 月。
- <sup>51</sup>胡振鹏, 胡松涛 (2006)《“猪一沼一果”生态农业模式》,《自然资源学报》, 第 21 卷 第 4 期 2006 年 7 月。
- <sup>52</sup>张维里, 冀宏杰, Kolbe H, 徐爱国 (2004)《中国农业面源污染形势估计及控制对策》, 中国农业科学 2004, 37 (7): 1018-1025。
- <sup>53</sup>杨帅, 温铁军 (2008)《发展生态农业的国际经验及本土试验》,《环境保护》, 2008.8A。
- <sup>54</sup>杨帅, 温铁军 (2008)《发展生态农业的国际经验及本土试验》,《环境保护》, 2008.8A。
- <sup>55</sup>张维里, 徐爱国, 冀宏杰 (2004)《中国农业面源污染形势估计及控制对策 III. 中国农业面源污染控制中存在问题分析》,《中国农业科学》2004, 37 (7): 1026-1033。
- <sup>56</sup>国务院发展研究中心国际技术经济研究所 (2006)《我国农业污染的现状分析及应对建议》。
- <sup>57</sup>国务院发展研究中心国际技术经济研究所 (2006)《我国农业污染的现状分析及应对建议》。
- <sup>58</sup>朱兆良 (中国环境与发展国际合作委员会农业面源污染课题组, 2004)《中国国农业面源污染问题迫在眉睫》,《首届中国生态健康论坛文集》。
- <sup>59</sup>杨帅, 温铁军 (2008)《发展生态农业的国际经验及本土试验》,《环境保护》, 2008.8A。