地下水硝酸盐污染治理研究

李玉中　王利民　徐春英　曹国民　董一威　等著

农业科学技术出版社

地下水硝酸盐污染治理研究

李玉中　王利民　徐春英　曹国民　董一威　等著

中国农业科学技术出版社

图书在版编目（CIP）数据

地下水硝酸盐污染治理研究 / 李玉中等著 . —北京：中国农业科学技术出版社，2014.12

ISBN 978-7-5116-1939-6

Ⅰ . ①地… Ⅱ . ①李… Ⅲ . ①地下水—硝酸盐—污染防治—研究 Ⅳ . ① X523

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2014）第 283131 号

责任编辑 于建慧
责任校对 贾晓红

出 版 者 中国农业科学技术出版社
北京市中关村南大街 12 号 邮编：100081
电　　话 （010）82109194（编辑室） （010）82109704（发行部）
（010）82109703（读者服务部）
传　　真 （010）82106650
网　　址 http://www.castp.cn
经 销 者 各地新华书店
印 刷 者 北京富泰印刷有限责任公司
开　　本 710mm × 1 000mm 1 /16
印　　张 20
字　　数 391 千字
版　　次 2014 年 12 月第 1 版 2014 年 12 月第 1 次印刷
定　　价 60.00 元

版权所有 · 侵权必究

前言

中国的水体正面临着硝酸盐等污染的严峻挑战，许多地区的地下水资源已不同程度受到了污染。我国北方13个市（县）69个点的调查结果表明，半数以上地下水硝态氮含量超标。课题组采样测量数据显示，山东省约有1/3的地下水样品硝态氮的含量超过了20mg/L，超过了国家农村饮用水标准，蔬菜集约化种植的地区，地下水硝酸盐污染尤为严重。

地下水硝酸盐污染在地下，但源头是在地上。

首先，城镇居民生活污水肆意排放，生活垃圾随意处理。一些城市的污水硝酸盐等指标没有达到国家排放标准就排放到河流湖泊中，污染着地表水，进而影响地下水，在广大农村，过去生活污水和粪便经过堆肥处理再施到农田中，而随着农业生产方式的调整，生活污水未经处理即直接排放；其次，养殖业畜禽粪便处理与管理不当。在中国的许多养殖场，畜禽粪便的处理都存在着严重的问题，有的养殖场粪便随意排放，资源化利用水平很低，不仅造成了当地的空气污染，也造成了地下水硝酸盐污染；然而，对于广大农村尤其是集约化种植地区，影响地下水最主要的因素是肥料不合理施用和过量投入。

中国已成为世界上化肥生产量和施用量最多的国家，我国化肥用量增加的速度很快，1949年全国化肥施用总量仅为0.6万t（养分，下同），1978年增至440万t。自1980年以来，以大约每年150万t的速度增加，至1988

年已猛增到 4 085 万 t，2005 年达到 4 637 万 t，2012 年超过 5 838 万 t。

近年来，蔬菜瓜果及果树类等需肥量较大的经济作物的种植面积迅速增加，例如，北京在将近 20 年的时间里，蔬菜瓜果类种植面积从 6.31 万 hm^2 增加到 12.52 万 hm^2，增加了 1 倍，果树的种植面积增加了 6.3 倍。经济作物的广泛种植，直接导致农田整体施肥量增大。同时，肥料的投入量远远超过了作物需求量，平均每公顷施用量从 1983 年的 115.3kg 增加到 2012 年的 440 kg，远远超出发达国家设定的 225 kg/ hm^2 的安全上限，菜田氮、磷养分过量施用情况尤其突出，保护地菜田全年肥料氮的用量高达 1 731.7kg/hm^2，相当于作物吸氮量的 4.47 倍，氮盈余量高达 1 344.0kg/hm^2，露地菜田氮的盈余也达到 1 038.8kg/hm^2。

长期以来，人们注重施肥的产量效应，对环境的负面影响和食品安全重视不够，在提高化肥利用率上虽然下了很多功夫，但因施用化肥的结构不合理、化肥分配不均、社会化服务程度低、管理不严等原因，致使一些地区肥料利用率和利用效率（肥效）下降，出现了明显的“报酬递减现象”。过量投入的化肥，没有得到合理的利用，造成了肥料的浪费，施氮肥流失的部分主要以气体形态挥发或反硝化，或通过地表径流和淋溶流失，造成土壤、地下水、地表水和空气的污染。从 1983 年到 2004 年，全国共有 41 880 万 t 氮肥流失。中国农业科学院和山东省农业科学院的研究结果表明，在粮田，氮肥的当季利用率大约在 30%~45% 之间，而对于集约化设施菜地，例如，寿光设施菜地，化肥年施用量平均高达 2 000kg/hm^2，氮肥的当季利用率不足 20%，甚至低至 10% 的水平！超过 45% 的化肥损失在环境之中，导致大范围地下水硝酸盐污染，采样点地下水硝酸盐超标率高达 60%。

要控制地下水硝酸盐污染，需要注意以下几个方面的问题。

第一，水体硝酸盐来源的辨识。目前，比较准确的方法是硝酸盐氮氧稳定同位素溯源方法，通过此方法可以区分硝酸盐污染物是来自化肥、粪肥还是生活污水，这样可以有目的地进行控制。

第二，在土壤肥料管理方面，要制定科学的施肥基准，指导农民科学施肥。日本在这方面做了非常有特色的工作，日本通过长期的科研和生产

试读结束，需要全本PDF请购买 www.ertongbook.com

实践活动的积累，不同的县都用相应的施肥基准，人们通过测定土壤相关指标，参照施肥基准，管理肥料的使用，这样就可以减少肥料的浪费，提高肥效，降低对环境的污染。根据此基准，当土壤养分高于基准值时，即可不用或者少用相应的肥料，如果土壤的养分不足，通过适当的补充所缺养分，可以使农产品的产量和质量平稳提高。在生产中也要注意堆肥的使用，通过合理地用堆肥中的养分替代化肥，减少化肥的使用量，也有利于农业环境的保护，但也要防止过量使用。

第三，加强农村生活污水、粪便、垃圾的管理。伴随着农村城镇化建设的发展，农村原来非常好的生活污水、粪便、垃圾等堆肥化自然循环的生产生活方式，由于楼房的大量出现正逐渐消失，绝大多数楼房的生活污水、粪便等未经处理直接排入河流和地下，这是中国新农村建设面临的最严峻的问题，需要各级政府客观正视并认真对待。

第四，严格控制畜禽粪便污染。要借鉴国外的先进经验，科学控制养殖规模，加强对畜禽养殖企业的管理，在动物粪便、废弃物资源化处理上普及认识，严格管控，从根本上解决养殖业对水体硝酸盐的污染。

对于地下水硝酸盐污染的治理，最重要的是履行政府职责，加强监管与引导。在科技发展的今天，涉及水体硝酸盐污染控制的方方面面都有成熟的技术，只需要适当地完善就可以应用，关键是要建立和形成有效的监管措施与机制。

本书是国家水体污染控制与治理科技重大专项“华北村镇地下饮用水安全保障技术研究与示范”课题的部分研究成果，通过本项目的实施，将在保持农产品产量和品质的条件下，减少化肥使用量，降低肥料对地下水环境的污染，保障饮用水安全，课题成果将可推广应用于北方的广大农区，具有很好的示范效果。感谢项目负责人梅旭荣研究员、朱昌雄研究员在项目执行过程中给予的指导。

鉴于研究者的水平有限，书中肯定存在不妥之处，敬请专家学者批评指正。

目录

1 地下水硝酸盐污染综合治理现状 / 1

1.1 日本地下水硝酸盐污染现状与对策 / 2

1.2 美国地下水硝酸盐污染现状与对策 / 10

1.3 欧盟地下水硝酸盐污染现状与对策 / 18

2 我国地下水硝酸盐污染特征分析 / 27

2.1 研究方法 / 27

2.2 研究区概况 / 45

2.3 山东省地下水硝酸盐污染背景 / 51

2.4 山东省地下水硝酸盐污染空间特征分析 / 56

2.5 山东省地下水硝酸盐污染的影响因素 / 63

2.6 北京市地下水硝酸盐污染背景及空间特征 / 76

2.7 山东省地下水硝酸盐污染区划 / 79

2.8 山东省地下水硝酸盐潜在污染分区研究 / 87

2.9 北京市地下水硝酸盐污染区划 / 97

3 地下水硝酸盐污染溯源 / 105

3.1 地下水硝酸盐污染来源判断方法 / 106

3.2 地下水硝酸盐氮氧同位素测定——离子交换树脂法 / 113

3.3 地下水硝酸盐氮氧同位素测定——反硝化细菌法 / 121

3.4 山东省地下水硝酸盐污染来源 / 131

4 地下水硝酸盐污染控制技术 / 145

4.1 硝化抑制剂的室内筛选与田间试验 / 146

4.2 集约化蔬菜种植区地下水硝酸盐污染负荷最大削减技术 / 163

4.3 露地茄子的氮素追施调控技术及其评估 / 198

4.4 缓控释肥料施用技术在集约化蔬菜种植区的应用 / 207

5 地下水硝酸盐处理技术研究 / 227

5.1 地下水硝酸盐处理技术研究进展 / 227

5.2 离子交换法地下水硝酸盐去除技术研究 / 237

5.3 生物反硝化法地下水硝酸盐去除技术研究 / 264

5.4 反渗透法地下水硝酸盐去除技术研究 / 283

5.5 反渗透法地下水硝酸盐去除技术中试研究 / 297

1 地下水硝酸盐污染综合治理现状

地下水是经济和社会发展以及人民生活所必需的、不可替代的重要资源。全球超过15亿人口主要依靠地下水作为饮用水（Alley et al，2002），然而，近年来，硝酸盐污染地下水已成为国际上普遍关注的问题，即便在欧美许多发达国家和地区也存在地下水硝酸盐含量严重超标的现象，尤其是在集约化农区（Goss et al，2005）。我国许多地区地下水也在不同程度上受到了硝酸盐的污染，尤其是农村地区地下水硝酸盐污染非常普遍（刘本先等，2009），且有日益严重的趋势（张维理等，1995；李玉中等，2013）。硝酸盐本身对人体虽无直接危害，但被还原为亚硝酸盐后却可诱发高铁血红蛋白症、消化系统癌症等疾病而威胁人体健康（Gulis et al，2002；浮海梅等，2009）。地下水一旦受到硝酸盐污染，将危及人民健康安全，且治理起来绝非易事。这是因为，进入地下水的硝酸盐污染物相当稳定，这种化学物质可以在浅层地下水中保留数十年（张庆东等，2008）。因此，加强预防，源头控制优于先污染后治理。

日本、美国、欧盟等国家地区，在地下水污染整体治理以及硝酸盐特定污染治理方面，具有一定经验，值得借鉴。

1.1 日本地下水硝酸盐污染现状与对策

1.1.1 日本地下水水质现状

日本的年均地下水使用量约为 123 亿 m^3，约占城市和农业用水总量的 13%。随着日本经济的高度发展，对地下水的采取量也亟剧增加，地盘下沉、盐水化和水质污染问题日益突出。日本政府采取了多方面的措施，特别是在及时制定相应的法律法规、构筑广泛而细密的实地监测系统，督促中央及地方、团体与个人共同维护地下水的用量与质量、鼓励技术研究与开发等，都以国策之重来努力推进。《日本环境基本法》规定了 26 项地下水水质环境标准（表 1-1），这 26 项内容为历次水质调查的主要指标。水质调查内容包括区域整体的地下水水质现状，污染井周边影响范围，以及对污染井的定期调查。

2009 年 11 月，日本环境省水大气环境局公布了 2008 年度（2008/4—2009/3）地下水质监测结果及全国地下水污染事例的调查报告。报告涉及市区町村数量为 1 371（占日本总数的 76%），其中，概况调查 1 113 市区町村（占日本总数的 62%）、污染井户周边地区 163 市区町村（占日本总数的 9%）、定期监测调查 896 市区町村（占日本总数的 50%）；涉及的井户数量 10 928 口，其中，概况调查 4 290 口、污染井户周边地区调查 1 434 口、定期监测调查 5 204 口。结果表明，根据 1993 年颁布的《日本地下水污染环境标准》，整体环境标准的超标率（各项超过环境标准的井户数 / 调查总数）为 6.9%（2007 年为 7.0%）。分项而言，硝态氮素及亚硝态氮素（4.4%）最高，其次是砷（2.4%）、氟（0.7%）、铅（0.3%）和硼（0.3%）。其中，硝态氮及亚硝态氮导致的地下水污染，尽管 1999 年标准正式颁布，其超标形势依然严峻。

从 1989 年开始，历年来对 26 项环境标准进行三大监测（概况调查、受污染井户周边环境调查、定期监测）的结果表明，概况调查中超标率最高的硝酸盐及亚硝酸盐，自 1999 年被追加制定环境标准以来，超标井户数量持续增加，至 2008 年达到历史最高；四氯乙烯从长期来看，呈现减少趋势；三氯乙烯和顺 -1，2- 二氯乙烯数值平稳；砷和氟呈缓慢增加状态。从分布地域来看，地下水污染超标情况在日本广泛而普遍。

1.1.2 地下水硝酸盐亚硝酸盐污染状况

由施肥、家畜排泄物、生活排污等多种原因引发的地下水硝酸盐亚硝酸盐污染，污染范围广泛。1999 年 2 月，日本环境省在《水质污染相关的环境基准及地下水水质污染相关的环境基准》的基础上，追加硝酸盐和亚硝酸盐为环境基准对

表 1-1 日本 26 项地下水水质污染环境标准

Table 1-1 Environment Standards (26 items) of Groundwater Water Pollution in Japan

编号	项目	基准值（mg/L）
1	镉	0.01 以下
2	氰	不得检出
3	铅	0.01 以下
4	六价铬	0.05 以下
5	砷	0.01 以下
6	汞	0.0005 以下
7	烷基水银	不得检出
8	PCB	不得检出
9	二氯甲烷	0.02 以下
10	四氯化碳	0.002 以下
11	1，2- 二氯乙烷	0.004 以下
12	1，1- 二氯乙烯	0.02 以下
13	顺 -1，2- 二氯乙烯	0.04 以下
14	1，1，1- 三氯乙烷	1 以下
15	1，1，2- 三氯乙烷	0.006 以下
16	三氯乙烯	0.03 以下
17	四氯乙烯	0.01 以下
18	1，3- 二氯丙烷	0.002 以下
19	秋兰姆	0.006 以下
20	西玛嗪	0.003 以下
21	杀草丹	0.02 以下
22	苯	0.01 以下
23	硒	0.01 以下
24	硝酸盐及亚硝酸盐 *	10 以下
25	氟	0.8 以下
26	硼	1 以下

*：硝酸盐及亚硝酸盐指标为 1999 年追加

试读结束，需要全本PDF请购买 www.ertongbook.com

象，并从当年开始进行长期监测。初步调查及持续监测结果表明，超标结果极为严重。因此，2001 年 7 月，通过推行水质污染防止法施行令，硝酸化合物等被追加指定为有害物质，受排水限制令和地下渗透限制令的约束。

图 1-1 至图 1-5 显示了日本环境省历年来对硝酸盐亚硝酸盐超标情况的调查结果（環境省水大氣環境局環境課地下水地盤環境室，2006，2007，2008，2009）。其中，1994—1998 年，由于只被列为预备监测项目（非正式监测项目），

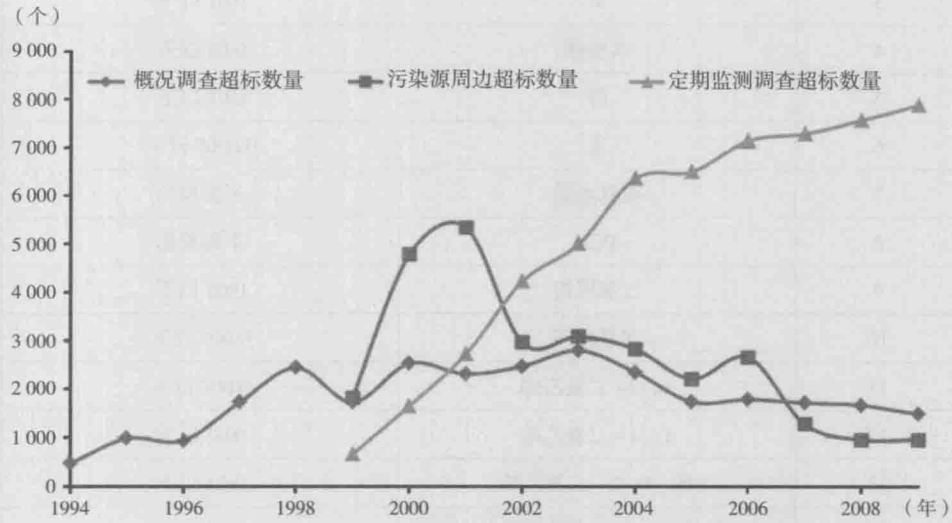

图 1-1　1994—2009 年日本硝酸盐亚硝酸盐不同监测超标数量

Fig. 1-1　Trend of Nitrite Nitrate Exceeding the Limit based on Monitoring Results from 1994-2009

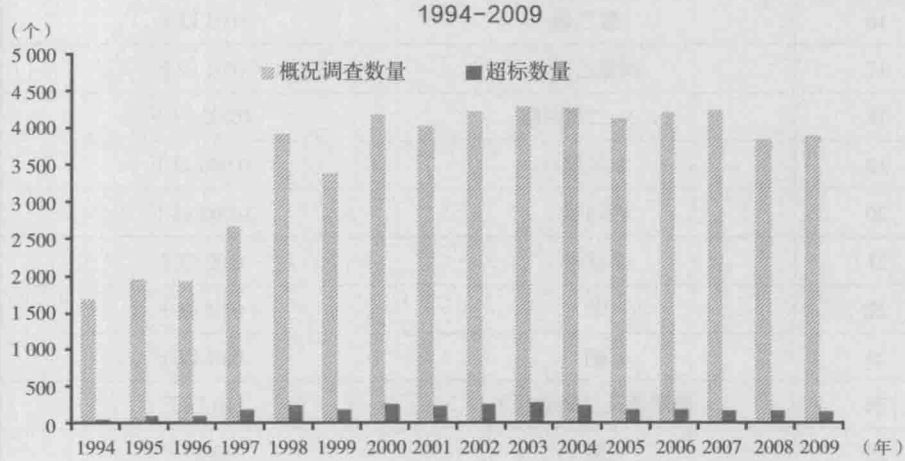

图 1-2　1994—2009 年硝酸盐亚硝酸盐概况调查监测结果

Fig. 1-2　Monitoring Result of 1994-2009 General Survey of Nitrite nitrate

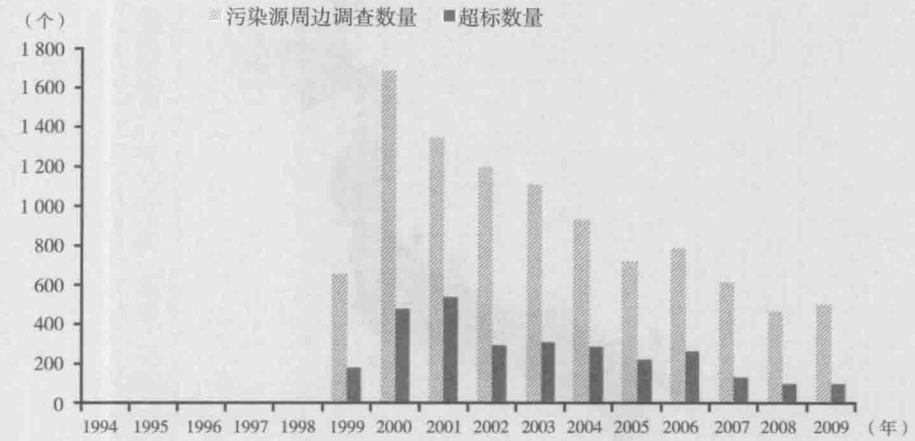

图 1-3 1994—2009 年硝酸盐亚硝酸盐污染井周边的详细监测结果

Fig. 1-3 Detail Monitoring Result of Periphery of Nitrite Nitrate polluted Wellsfrom 1994-2009

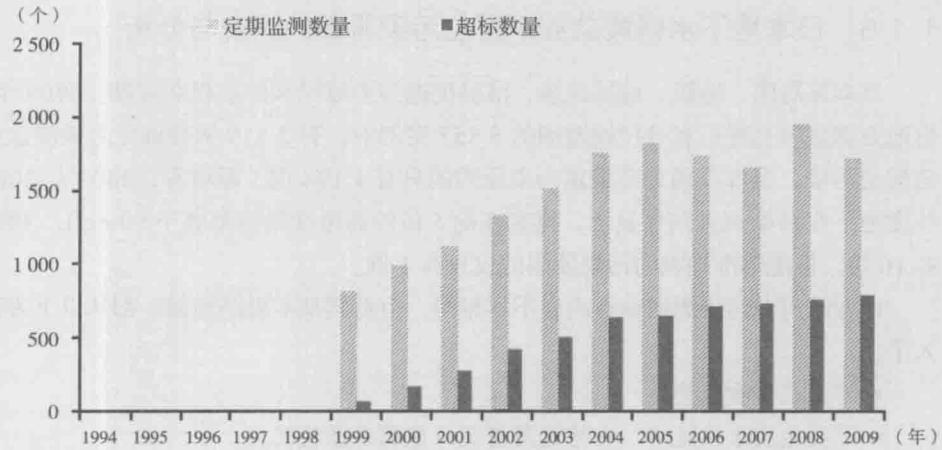

图 1-4 1994—2009 年硝酸盐亚硝酸盐持续定期监测结果

Fig. 1-4 Result of Continuous and Regular Monitoring of Nitrite Nitrate from 1994-2009

所以只有概况调查统计数据（图 1-5）。

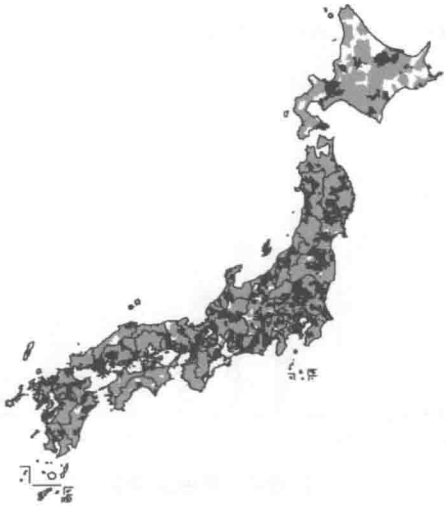

图 1-5　2006—2009 年调查结果显示的硝酸盐与亚硝酸盐超标地区分布

Figure 1-5　Distribution of Regions with Monitoring Result of Nitrate and Nitrite Exceeding the Limit from 2006-2009

注：深色部分显示了超标井所在市町村，不表示地下水污染范围

1.1.3　日本地下水硝酸盐亚硝酸盐污染原因的调查与分析

日本属岛国，地形、地质复杂，准确把握污染原因和污染程度较难。2009 年，由地方都道府县进行有效持续监测的 5 857 案例中，有 2 319 例被确定为硝酸盐亚硝酸盐污染，但可以确定或推定污染原因的只有 1 198 例（環境省，2009）。2009 年度地下水污染调查结果显示，排名在前 5 位的高浓度污染都高于 90mg/L，超标 9~10 倍，但能够准确判明污染原因的仅只有 1 例。

地方政府对污染源的调查内容不尽相同，但是其基本思路相似，都从以下方面入手。

- 污染范围和程度；
- 污染地的水文地质、土地利用情况、施肥耕作状况；
- 土壤分析；
- 各载体的氮收支状况；
- 分析方法广泛采用水质解析法、氮稳定同位素比值法、重回归分析、多变量解析法等。

在上述硝酸盐亚硝酸盐污染事例 2319 例中，已经明确或可推断污染原因而采

取氮素减排对策的有466例，具体情况如下。

- 施肥污染862例中的290例，占34%；
- 家畜排泄物污染294例中的166例，占56%；
- 生活排水污染254例中的126例，占50%。

但是，对污染原因不明确的事例，大多数都没有轻易采取氮素减排措施，1255例中只有146例采取氮素减排措施，占12%。可见，为了推动氮素减排措施的实行，需要进一步加强前阶段的污染原因判断，及时实施负荷减排对策。

结果显示，日本地下水硝酸盐亚硝酸盐污染原因主要集中在以下几方面：施肥过量或不当；家畜排泄物；生活排水排污；降雨等自然原因。

1.1.4 日本地下水硝酸盐亚硝酸盐污染治理对策

为推动地下水硝酸盐亚硝酸盐污染治理，各都道府县分别制定符合当地情况的氮素减排目标及对策并认真实施，对污染范围、污染原因和治理对象对策等保持共识的同时，针对不同氮素负荷发生源设定不同减排目标并探讨相应对策。2001年7月，日本环境省颁布《关于硝酸盐亚硝酸盐相关的水质污染对策手册》，对由硝酸盐亚硝酸盐引起的地下水污染的原因调查、对策探讨等作了指导性说明。

地下水硝酸盐污染主要原因一旦确认后，日本地方政府往往都会指导采取相应措施，并保持对治理效果的反馈，甚至指导当地农家提高自身应对能力，如学会计算简易肥料成分推定方法，或利用简易分析计测定土壤中硝态氮含量，随时观察治理效果。整体来看，其针对硝酸盐污染还是普遍在以下3方面展开治理。

- 施肥：按施肥标准落实详细超标量，调整施肥量或施肥时间，实施减肥计划，或者改用肥效调节型肥料、水肥一体化技术等。
- 家畜排泄物：按照《妥善管理和利用家畜排泄物相关规定》调整与改进家畜粪便处理方式，改善粪便处理池、堆肥设施。
- 生活排水：整顿或改变下水道、农业集体排水设施、净水槽（環境省，2003—2010）。

1.1.5 日本地下水硝酸盐污染净化技术

治理大面积的地下水硝酸盐污染是一个世界性的难题，目前，除利用自然净化过程中的反硝化作用外，没有特别有效的办法除去局部地下水中的硝酸盐，即主要是靠工程措施来解决，例如，在受污染的含水层中加入铁粉、活性炭、微生物等，使硝酸盐降解为无色无味的气体。

虽然一些硝酸盐净化技术的净化效果已经得到论证及承认，但是，其经济性和适用的广泛性仍然受到质疑，净化技术在日本的真正普及依然有待时日。从现实处

理效果、稳定性和经济性来看，生物脱氮法如循环式硝化脱氮法已经比较多地运用到污水排水与粪尿除氮系统中。而污染前技术、土壤防溶脱技术、污染后技术、地下水原位净化技术与扬水后处理技术，仍然只是作为辅助手段，运用于某些特殊案例中（農林水产省，2007；2008）。近年来，为找到可普及的地下水净化技术，环境省和各企业研究所联合，从2004—2008年历时5年，在日本各地选取典型环境，对11项典型性实用技术进行了验证性试验（環境省，2009）。从试验结果来看，硝态氮还未到达地下水之前的土壤防淋溶技术，显现了较好的实用性和经济性。土壤中投入硬脂酸为主的缓释性脱氮粉末，或持续注入液态油酸、液态糖，在不同的投入实验方法中，均在短期内（6个月内）达到脱氮率90%~100%，脱氮效果显著，并且可广泛适用于茶园等大量肥料施用田，成本较低。

原位分解技术是环境省重点攻关的课题，它占地小，可集中亦可分散实施，还适用于流动的地下水状态。在此次验证试验中，分别运用了以下多种脱氮剂和净化方法观察效果。

（1）生物修复技术

将易分解性营养剂注入地下水，促进地下水流动过程中微生物的脱氮反应（東和科学株式会社，2007）；在地下水流经线路上排列填充孔，内填马铃薯渣（当地农副产品废弃物），促进原地微生物的脱氮反应（東和科学株式会社，2006）。

（2）自然能源净化技术

在地下水深处埋设脱氮细菌固定电极，利用水电解产生的氢实现硝态氮净化（株式会社ヤマト，2004）

（3）透过性净化壁技术

在带水层地下水流经线路上设置圆柱形净化壁，净化壁由生物降解性塑料和铁粉做脱氮剂（大成建設株式会社，2008）；亦或采用硫黄·钙基板为主的硫黄酸化脱氮细菌做脱氧剂（新日鉄エンジニアリング株式会社，2008）。

环境省生物降解性塑料和铁粉作脱氮剂的透过性净化壁技术已实验多年，3年内达到接近100%的净化率，8年后仍然保持了0.5~10mg/L的有效净化效果，显示了较好的稳定性。

针对生物反应格栅的载体问题，许多日本公司也开发出了不同类型的生物膜载体，例如，日本电信电话公司（NTT）研制出了废纸浆球状载体，也取得了很好的效果；日本奥尔加诺公司开发出利用触媒有效分解硝酸根离子等氮化物的技术，通过将钯与另一种催化剂混合在一起，对地下水进行逐步处理。

1.1.6 案例研究——以岐阜县为例

1.1.6.1 岐阜县各务原市自然概况

岐阜县各务原市位于浓尾平原北部，人口约14.55万人（2012年）。在20世纪70年代市内东部农田地带的地下水中发现含有高浓度硝态氮。由于当时所有上水道的水源都依靠地下水，人们普遍担心不久的将来还是会对水道水源井产生影响。

进入20世纪80年代开始了真正的调查，结果发现其主要原因是农田撒施的氮肥渗入到地下所致。1990年实施了减少施肥计划，污染状况至1994年有了显著改善。但是，由于这种典型的由大范围农耕施肥引起的污染，不可能把氮素负荷量降至为零，所以，在这之后未见更显著的缓解。

各务原市除了北部、东部的丘陵地外，普遍覆有一种被称为腐殖土的表土，厚60~100cm，普种胡萝卜。其下面有3层沙砾层，距基层岩石的深度甚至可达到100m（市西南），储存着典型的非承压地下水。因此，地下水容易受地上影响，污染物质也容易渗透过表土到达地下水面。

1.1.6.2 岐阜县地下水污染处理对策

（1）地下水污染净化技术

源于欧美技术的引进，经过本土的消化和再创造，再与土壤污染治理法规相结合，日本已经逐渐形成了种种适合本国自然条件和社会条件的土壤地下水污染修复技术。它不同于表面水污染和大气污染的治理，大气污染治理靠抑制对环境的排放为主要手段，而土壤地下水污染则是以环境本身作为修复对象，需要各种各样的对策。以下就以岐阜县渗透性地下水净化壁实验予以说明。

岐阜县各务原市自1999年12月至2003年1月，历经3年多，对硝酸盐污染的地下水原点净化技术（非抽水技术）进行了验证性测试，已完成当初设定的目标。测试试验和施工由岐阜县委托大成建设株式会社进行，现场观测、水质测定和数据分析由大成建设和岐阜县保健环境研究所共同实施。选择各务原市作为测试地是因为该市20多年前就已发现硝态氮引发地下水污染，之后施行了减少施用肥料的对策，污染状况有一定缓解。

该实证试验中运用的地下水硝酸盐污染的净化原理，是利用反硝化细菌等微生物对硝态氮的净化功能，通过生物脱氮处理而达到净化地下水的目的。在渗透性净化壁工程中加入生物性脱氮工艺，使污染的地下水在原地点实行净化成为可能。试验中采取了垂直方向净化壁（净化从地表向土壤里渗透的垂直方向的渗透水）、水平方向净化壁（在带状地下水水平方向流动过程中实行净化）2种试验。垂直方向实验表明，硝态氮浓度无论在哪个条件下，都显现出深度越深浓度越低的倾向。水

试读结束，需要全本PDF请购买 www.ertongbook.com