

马林, 卢洁, 赵浩, 等. 中国硝酸盐脆弱区划分与面源污染阻控[J]. 农业环境科学学报, 2018, 37(11): 2387-2391.

MA Lin, LU Jie, ZHAO Hao, et al. Nitrate Vulnerable Zones and strategies of non-point pollution mitigation in China[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2018, 37(11): 2387-2391.

## 中国硝酸盐脆弱区划分与面源污染阻控

马林, 卢洁, 赵浩, 柏兆海, 胡春胜\*

(中国科学院遗传与发育生物学研究所农业资源研究中心/中国科学院农业水资源重点实验室/河北省节水农业重点实验室, 石家庄 050021)

**摘要:**近年来,我国由农业源引发的水体污染愈发严重,这不仅对生态环境造成了影响,同时也让人类赖以生存的饮用水安全受到威胁。因此,如何有效阻控农业面源污染,保护水资源和生态安全意义重大。欧美等国家通过划分硝酸盐和磷污染风险区,以此为依据制定了相关区域法案政策,实施重点区域面源污染阻控和水污染防治,获得了很好的面源污染消减效果。因此,本文分析了欧美等国家通过划分硝酸盐脆弱区制定区域养分管理法案法规,消减水体硝酸盐面源污染风险的经验;阐述了我国硝酸盐脆弱区初步划分的结果,提出了我国针对硝酸盐脆弱区的农业面源污染区域阻控的建议,旨在为我国农业绿色发展和绿色生态环境构建提供科学依据。

**关键词:**面源污染;硝酸盐脆弱区;氮磷污染阻控;养分管理;NUFER模型

中图分类号:X592 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2018)11-2387-05 doi:10.11654/jaes.2018-1369

### Nitrate Vulnerable Zones and strategies of non-point pollution mitigation in China

MA Lin, LU Jie, ZHAO Hao, BAI Zhao-hai, HU Chun-sheng\*

(Center for Agricultural Resources Research, Institute of Genetics and Developmental Biology, Chinese Academy of Sciences/Hebei Key Laboratory of Water-Saving Agriculture/Key Laboratory of Agricultural Water Resources, Chinese Academy of Sciences, Shijiazhuang 050021, China)

**Abstract:** Water contamination caused by agricultural source pollution has become more severe in recent years in China. This was not only impacted the ecological protection and but also put the safety of drink water in danger. Therefore, controlling the agricultural non-point and point pollution effectively is of great significance to secure sustainable water use and ecological environment protection.. The European Union (EU) and United States of America (USA) identified the regions which were sensitive to nitrate and phosphorus losses, and based on this developed the region specific nutrient management strategies. Through implement agricultural non-point source control and water pollution prevention practices in the nitrate vulnerable zone, the water contamination has been greatly improved in the EU member. In this study, we analyzed the how the EU countries setup region specific nutrient management practices based on the design of the nitrate vulnerable zones, and draws on the lessons about non-point pollution management from the experience from these countries. The first preliminary results of Nitrate Vulnerable Zones of in China has been showed. We also put forward some targeted advice on pollution prevention and control, aiming at contributing to the agricultural green development and the construction of green ecological environment.

**Keywords:** non-point pollution; Nitrate Vulnerable Zones; mitigation options of N and P losses; nutrient management; NUFER model

收稿日期:2018-10-24 录用日期:2018-10-30

作者简介:马林(1979—),男,河北张家口人,研究员,博士生导师,从事养分资源管理和农业生态学研究。E-mail: malin1979@sjziam.ac.cn

\*通信作者:胡春胜 E-mail: cshu@sjziam.ac.cn

基金项目:国家重点研发计划项目(2016YFD0800106);河北省现代农业产业技术体系奶牛产业创新团队项目(HBCT2018120206);河北省杰出青年基金项目(D2017503023);中国科学院“百人计划”项目

**Project supported:** The National Key R&D Program of China(2016YFD0800106); The Dairy Industry Innovation Team of Modern Agricultural Technology System of Hebei Province(HBCT2018120206);The Science Fund for Distinguished Young Scholars of Hebei Province (D2017503023);The 100-Talent Project of Chinese Academy of Sciences

农业面源污染是水体氮磷污染的主要源<sup>[1]</sup>。二十世纪八十年代以来,我国为了保障粮食安全和提高作物单产,过量施用化肥、大水漫灌、畜禽粪尿随意向环境排放等问题突出,由此引起的面源污染,尤其是农田和养殖场氮磷淋溶损失造成的地下水污染问题在农区日益严重<sup>[2]</sup>。大量的化肥施入农田,在没有合理的农业管理措施情况下,作物对养分的利用率降低,其中氮肥的利用率只有约30%~40%<sup>[3]</sup>,绝大部分以 $\text{NO}_3^-$ -N的形式累积于土壤中,在遭遇强降雨或灌溉后, $\text{NO}_3^-$ -N随水以淋溶和径流等方式进入地下水和地表水,造成地下水硝酸盐污染和水体富营养化<sup>[4-5]</sup>。研究显示,非根层土壤每年约有68%的 $\text{NO}_3^-$ -N残留,其中约有20%的 $\text{NO}_3^-$ -N渗入地下水<sup>[6]</sup>。据北京、河北、陕西、东北等18个行政区2103眼水井监测结果表明:我国80%以上监测点地下水污染严重,为IV和V类,其中与农田淋溶相关的“三氮”(氨氮、亚硝态氮、硝态氮)污染最为严重<sup>[7]</sup>。此外,相关调查显示北方环渤海七省市(北京、河北、河南、山东、辽宁、天津和山西)地下水 $\text{NO}_3^-$ -N含量平均值达到 $11.9 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ,约有34.1%的地下水超过了WHO制定的饮用水标准<sup>[8-9]</sup>。可见, $\text{NO}_3^-$ -N的淋溶损失不仅造成了严重的环境风险或直接的环境污染,同时也会对人体健康造成巨大威胁<sup>[4]</sup>。欧美等国家通过划分硝酸盐污染脆弱区和风险区,以此为依据制定相关区域法案政策,实施重点区域面源污染阻控和水污染防治,获得了很好的面源污染消减效果。而我国尚缺乏针对硝酸盐脆弱区的农业面源污染区域阻控策略研究。

## 1 我国地表和地下水硝酸盐污染问题堪忧,威胁水源安全

我国大部分地表水和地下水污染日益严重。据报道,我国31%的监测河流水质为劣IV类水。其中十大流域中,仅西南和西北流域的水质达标,为I-III类水,其余均为劣IV类水。九大重要海湾中有六个被划为IV类或劣V类水质。原国土资源部针对地下水水源地的监测数据显示,2015年受监测的饮用水水井有62%水质超标<sup>[10]</sup>。同期,水利部针对浅层地下水的监测数据表明,超过80%的浅层地下水水质为IV类以上<sup>[7]</sup>。而IV类以上水质一般仅能用作娱乐和工业用水,不适宜人体的直接接触和饮用。

“三氮”(氨氮、亚硝态氮、硝态氮)超标严重,农业是水体氮排放和污染的重要来源。我国劣IV类水质硝酸盐含量为 $130 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ (GB 14848—2017)<sup>[11]</sup>,而世

界卫生组织(WHO)推荐的饮用水硝酸盐含量标准值为 $50 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ <sup>[9]</sup>,是水源污染的主要原因之一。饮用水中硝酸盐超标会直接危害人体健康,导致蓝婴症<sup>[12]</sup>等疾病。据估计,我国目前仍有将近2亿人口饮用具有安全隐患的地下水<sup>[13]</sup>。2010年2月6日环保部公布的《第一次全国污染源普查公报》数据显示农业源向水体总氮、总磷排放量分别为270万t和28万t,分别占氮、磷排放总量的57%和67%<sup>[14]</sup>。而地表水中氮和磷的超标会导致水体富营养化等问题。因此,要从根本上解决上述问题,必须把“三氮”污染防治直接纳入到国家环境保护体系中。

划定硝酸盐脆弱区是防控面源污染和保证水源安全的关键。近年来,我国对水环境问题愈加重视,颁布了一系列水污染防治政策和法规,如:2015年的《水污染防治行动计划(水十条)》([http://www.gov.cn/zhengce/content/2015-04/16/content\\_9613.htm](http://www.gov.cn/zhengce/content/2015-04/16/content_9613.htm))和2018年的《水污染防治法(修订案)》([http://www.npc.gov.cn/npc/xinwen/2017-06/29/content\\_2024889.htm](http://www.npc.gov.cn/npc/xinwen/2017-06/29/content_2024889.htm))。同时,我国对农业面源污染的源头防控工作也非常重视,相继实施了“化肥使用量零增长,有机肥替代”“畜禽粪尿资源化”等重大行动方案,科技部组织了“两减”和“面源”两个重大研发专项。然而,目前对农业“三氮”污染问题重视不够,具体表现在:(1)涉及农业源水污染防治的条目较少,缺乏精准的问题导向;(2)没有识别出水污染关键防控区域,以“各自作战”的形式在全国一刀切的实施,并未建立针对硝酸盐脆弱区的养分优化管理和面源污染防控方案;(3)更缺少不同技术与模式对硝酸盐脆弱区面源污染阻控的监测与评估机制,难以支撑我国农业绿色发展的全面实施。

## 2 欧美国家通过划分硝酸盐脆弱区,消减水体硝酸盐面源污染风险

水污染问题遍布全球,欧盟通过划定硝酸盐脆弱区,实现了水环境的保护。1991年,欧盟颁布了《硝酸盐法案》,旨在利用良好的农业实践保护欧洲各地的水资源,减少农业源硝酸盐水体污染,并避免地表水体和地下水进一步受到污染<sup>[15-17]</sup>。《硝酸盐法案》规定所有欧盟成员国必须划定硝酸盐脆弱区,包括:硝酸盐脆弱区(地表或地下水硝酸盐浓度超过 $50 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ),硝酸盐潜在污染区(若不采取行动扭转该趋势,地表或地下水硝酸盐浓度可能会超过 $50 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ )和水体富营养化区(淡水、河口、沿岸海域和海洋水域,发现是富营养化或若不采取行动扭转该趋势,

可能成为富营养化)。在这些区域内强制实施一系列的氮磷养分管控措施,如:基于作物养分需求科学施肥,划定作物施肥限量、禁止施肥时间,规定畜禽粪尿最小储藏容量和有机肥最大施用量等。此外,欧盟还建立了完善的监测和评估体系,每5年对硝酸盐脆弱区的硝酸盐增减情况进行评估,以此为依据对各成员国进行奖惩。据相关研究结果显示,欧盟的硝酸盐法案已经使得欧洲农业源氮污染显著降低。该研究通过模型模拟得出,相比于未执行该指令的情况,执行该指令可使得2008年硝酸盐排放量减少16%,若继续严格执行,将会获得更好的减排效果<sup>[16]</sup>。此外,再以英国为例,其划定了32个硝酸盐脆弱区<sup>[18]</sup>。按照农民自愿参与的原则签订协议,明确在5年之内逐渐减少化肥施用量,对于化肥减施给农户造成的损失,政府按照土地面积给予补偿,具体的补偿数额按照土壤硝酸盐含量来确定。经过法案的实施,以及对硝酸盐脆弱区硝酸盐情况的监测和评估,1998年和2006年,英国的32个硝酸盐脆弱区中分别有60%和90%的土地达到了欧盟环境标准<sup>[19]</sup>。

美国是世界上水环境法律发展较早,且体系较完善的国家之一。1972年,美国颁布了《清洁水法案》<sup>[20-21]</sup>。该法案不仅对水质标准作出了规定,还针对水环境管理提出了建议,是美国最为重要和全面的水环境法律。《清洁水法案》重点针对水体磷的富营养化污染风险问题。这主要是因为美国主要河流的氮含量呈下降趋势,但是磷含量逐渐增加。虽然美国没有全国性的划定氮磷污染的风险区,但是联邦政府要求各州政府提交一份境内污染水域或者潜在污染水域清单,确定每天氮磷污染物排放的最高限量,以此为依据制定农户最佳养分管管理计划、监测和评估体系<sup>[22-25]</sup>。美国虽与我国处于不同发展阶段,但其环境政策在一定程度上值得我国借鉴。

总之,欧美国家通过识别硝酸盐污染脆弱区和风险区,制定重点区域水污染防治方案,通过补贴来推进农户养分优化管理措施的实施,同时建立完善的监测体系和评估体系,达到了很好的面源污染消减效果。

### 3 划定我国硝酸盐脆弱区和建立面源污染监测评估体系

新时代呼唤农业绿色发展,更需要构建绿色生态环境,因此亟需划定我国农业硝酸盐脆弱区及建立监测评估体系,为推进化肥减施、有机肥替代、畜禽粪尿

资源化、面源污染阻控和农业绿色发展等国家重大行动提供抓手。中科院石家庄农业资源中心依托国家重点研发专项、国家自然科学基金重点项目等资助,与国内外十多家科研院校合作,对农业硝酸盐脆弱区划分和区域阻控办法等工作开展了系统研究,提出了如下建议。

#### 3.1 划定硝酸盐脆弱区,明确水体污染防治重点区域

研究根据欧盟国家硝酸盐脆弱区划分标准以及我国地下水环境质量标准,设置了我国硝酸盐脆弱区的划分标准。利用地下水硝酸盐监测数据、环境公报发布的水质数据、分县农业统计资料和土壤地质信息等数据,初步划分了我国硝酸盐脆弱区和潜在脆弱区。具体划分标准包括:(1)地下水或地表水已受硝酸盐污染的区域或富营养化或有富营养化潜在风险的水体划为硝酸盐脆弱区;(2)氮素淋溶风险高( $\text{leaching} > 22.6 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ )的区域划为潜在硝酸盐脆弱区;(3)氮素径流风险高( $\text{runoff} > 28.3 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ )的区域划为潜在硝酸盐脆弱区;(4)其余区域则为无硝酸盐污染风险耕地。其中淋溶风险评估数据通过NUFER模型模拟计算获得。划分结果如图1所示,该结果已发表<sup>[26-27]</sup>。

研究结果显示:我国硝酸盐脆弱区和潜在脆弱区覆盖了约7400万 $\text{hm}^2$ 耕地(约占总耕地面积的56%),其中脆弱区面积为5300万 $\text{hm}^2$ ,潜在脆弱区面积为2100万 $\text{hm}^2$ ,水域受污染情况也十分突出。大部分硝酸盐脆弱区分布在农业生产密集的环渤海区域。东北地区的黑龙江省及长江三角洲部分地区,由于作物

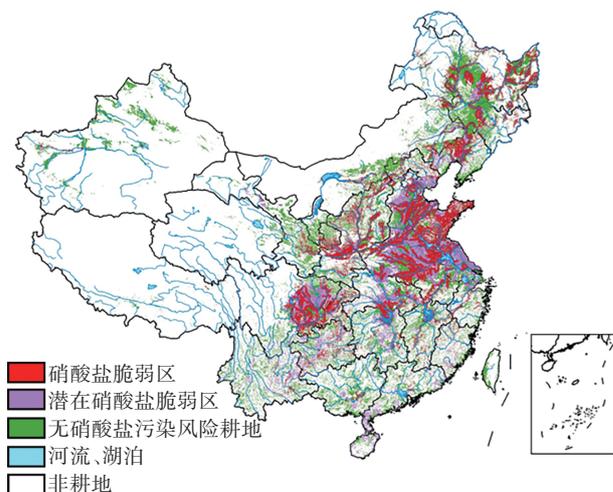


图1 我国硝酸盐脆弱区分布图

Figure 1 Distribution of nitrate vulnerable zones in China

和畜牧生产集约化、地下水位浅,且地下水硝酸盐浓度高等因素,也被划分为脆弱区。此外,位于西南地区的四川和重庆地区,由于当地属丘陵地貌,氮磷径流损失风险较高,因此也被列入到脆弱区内。

初步划定的硝酸盐脆弱区仍存在较大的不确定性。未来的工作应以此为依据,建立监测网络,划定更为精准的硝酸盐脆弱区,主要考虑以下4大原则:一是根据全国主要水体的富营养化、水体硝酸盐和全磷含量情况,明确污染水体位置和面积;二是考虑全国不同区域的氮磷地下水淋失风险;三是考虑全国不同区域地表水氮磷径流和侵蚀损失风险;四是重点考虑不同区域畜禽养殖体系点源氮磷排放风险。

### 3.2 制定硝酸盐脆弱区的养分管理区域优化方案,推进农户最佳养分管理技术和模式

未来研究还应该组织相关专家开展专项研究,提出针对脆弱区和潜在脆弱区养分损失特征的一系列氮磷淋溶和径流损失消减方案。依托“两减”“面源”等国家重点研发专项的成果,明确不同脆弱区作物最大施肥限量、肥料禁施期和养分优化管理方案。此外,还应针对畜禽粪尿资源化和有机肥替代等问题,设立重点研发专项以开展系统研究,明确不同畜禽粪尿种类的养分含量、畜禽粪尿最大施用限量、畜禽粪尿储藏最小容量和化肥替代率等指标,提出畜禽粪尿“饲舍-储藏-处理-施用”全链条养分资源化利用切实可行的方案。同时,针对农牧分离的问题,提出农牧结合的最佳养分优化管理方案,编制技术手册,明确哪些技术组合和模式可实现硝酸盐脆弱区养分水体排放的消减。2015年农业部已提出《到2020年化肥使用量零增长行动方案》([http://www.moa.gov.cn/zwllm/tzgg/tz/201503/t20150318\\_4444765.htm](http://www.moa.gov.cn/zwllm/tzgg/tz/201503/t20150318_4444765.htm)),要求把握好“精、调、改、替”4字要领,即推进精准施肥、调整化肥施用结构、改进施肥方式、有机肥替代化肥,并有一系列相应保障措施的推进、扶持与支撑。同年,国务院发布了《水污染防治行动计划》([http://www.gov.cn/zhengce/content/2015-04/16/content\\_9613.htm](http://www.gov.cn/zhengce/content/2015-04/16/content_9613.htm)),提出控制农业面源污染,实行测土配方施肥,推广精准施肥技术和机具。并发展农业节水,推广渠道防渗、管道输水、喷灌、微灌等节水灌溉技术,完善灌溉用水计量设施。由此基础的启发与引导,预计在不久的将来,通过结合各个区域农业环境和管理特点,国家会制定更加具体的施肥原则和措施,推出更加具体详细的减排标准、规定以及推荐管理办法,有针对性地指导并进行减排工作。

### 3.3 建立全国硝酸盐脆弱区养分监测网,完善水环境评价体系和响应机制

进一步深入研究和制定标准的水质、硝酸盐淋溶和径流损失的监测方法,建立全国性地表和地下水水质监测体系,用于评估脆弱区养分淋溶风险以及消减措施与政策的效果。农业农村部牵头建立农户、区域和流域的养分平衡和管理措施的报告制度,如:记录化肥购买和施用量、有机肥产生和施用量、畜禽粪尿储藏容量等。建立硝酸盐脆弱区养分区域优化方案、农户最佳养分管理技术与水体污染监测的响应体系,以此为依据建立农户和区域的补贴、监督和奖惩机制,每3~5年组织评估反馈以支撑农业绿色发展和面源污染阻控。

#### 参考文献:

- [1] 钱 易, 陈吉宁. 中国区域农业资源合理配置、环境综合治理和农业区域协调发展战略研究. 农业环境污染的系统分析和综合治理[M]. 北京: 中国农业出版社, 2008.  
QIAN Yi, CHEN Ji-ning. Study on strategy of rational allocation of regional agricultural resources, comprehensive treatment of environment and coordinative development of agricultural regions in China, systematic analysis and comprehensive management of agricultural environmental pollution[M]. Beijing: China Agricultural Press, 2008.
- [2] 刘宏斌. 农田面源污染监测方法与实践[M]. 北京: 科学出版社, 2015.  
LIU Hong-bin. Establishment and application of monitoring technology on nonpoint pollution from arable land[M]. Beijing: Science Press, 2015.
- [3] Ju X T, Xing G X, Chen X P, et al. Reducing environmental risk by improving N management in intensive Chinese agricultural systems[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2009, 106(9):3041-3046.
- [4] Vitousek P M, Naylor R, Crews T, et al. Nutrient imbalances in agricultural development[J]. *Science*, 2009, 324(5934):1519-1520.
- [5] 巨晓棠, 刘学军, 张福锁. 冬小麦/夏玉米轮作中 $\text{NO}_3^-$ -N在土壤剖面的累积及移动[J]. 土壤学报, 2003, 40(4):538-546.  
JU Xiao-tang, LIU Xue-jun, ZHANG Fu-suo. Accumulation and movement of  $\text{NO}_3^-$ -N in soil profile in winter wheat/summer maize rotation[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2003, 40(4): 538-546.
- [6] Yadav S N. Formulation and estimation of nitrate-nitrogen leaching from corn cultivation[J]. *Journal of Environmental Quality*, 1997, 14(3):506.
- [7] 中华人民共和国水利部. 地下水动态月报[EB/OL]. (2016-4-12) [2018-10-25]. <http://www.mwr.gov.cn/sj/tjgb/dxsdyb/>.  
The Minister of Water Resources of the People's Republic of China. Groundwater dynamic monthly[EB/OL]. (2016-04-12)[2018-10-25]. <http://www.mwr.gov.cn/sj/tjgb/dxsdyb/>.
- [8] 赵同科, 刘宝存. 泛环渤海地区地下水硝酸盐格局与控制[M]. 北

- 京:科学出版社,2014.
- ZHAO Tong-ke, LIU Bao-cun. Situation of nitrate in groundwater in regions of the Fan-Bohai sea and its control[M]. Beijing: Science Press, 2014.
- [9] World Health Organization (WHO). Water safety and quality: Guidelines for drinking-water quality 978-92-4-154995-0—2017[S]. [http://www.who.int/water\\_sanitation\\_health/water-quality/en/](http://www.who.int/water_sanitation_health/water-quality/en/).
- [10] Han D M, Currell M J, Cao G L. Deep challenges for China's war on water pollution[J]. *Environmental Pollution*, 2016, 218:1222-1233.
- [11] 中华人民共和国自然资源部. 地下水质量标准: GB/T 14848—2017[S]. 北京:中国标准出版社, 2017.
- Ministry of Natural Resources of People's Republic of China. Quality standard for ground water: GB/T 14848-2017[S]. Beijing: Standard Press of China, 2017.
- [12] Comly H H. Cyanosis in infants caused by nitrates in well water[J]. *Journal of the American Medical Association*, 1945, 257(20):2788-2792.
- [13] 张昊. 我国2.8亿居民饮用水不安全[J]. 吉林医学信息, 2014(4):11.
- ZHANG Hao. Unsafe drinking water for 280 million residents in China[J]. *Jilin Medical Information*, 2014(4):11.
- [14] 中华人民共和国国家统计局. 第一次全国污染源普查公报[EB/OL]. (2010-02-6)[2018-10-25]. [http://www.stats.gov.cn/tjsj/tjgb/qt-tjgb/qgqqtjgb/201002/t20100211\\_30641.html](http://www.stats.gov.cn/tjsj/tjgb/qt-tjgb/qgqqtjgb/201002/t20100211_30641.html).
- National Bureau of Statistics of China (NBSC). The first national pollution source census bulletin[EB/OL]. (2010-02-6)[2018-10-25]. [http://www.stats.gov.cn/tjsj/tjgb/qqtjgb/qgqqtjgb/201002/t20100211\\_30641.html](http://www.stats.gov.cn/tjsj/tjgb/qqtjgb/qgqqtjgb/201002/t20100211_30641.html).
- [15] Goodchild R G. EU policies for the reduction of nitrogen in water: The example of the Nitrates Directive[J]. *Environmental Pollution*, 1998, 102(1):737-740.
- [16] Velthof G L, Lesschen J P, Webb J, et al. The impact of the nitrates directive on nitrogen emissions from agriculture in the EU-27 during 2000—2008[J]. *Science of the Total Environment*, 2014, 468/469(5): 1225-1233.
- [17] Oenema O, Bleeker A, Braathen N A, et al. Nitrogen in current European policies: Chapter 4[M]. European Nitrogen Assessment Sources Effects & Policy Perspectives, 2011.
- [18] Defra. Guidance for farmers in nitrate vulnerable zones: Planning nitrogen use[M]. London: Environment Agency, Dfefa, 2009.
- [19] ADAS. Nitrates in water the current status in England(2006)[EB/OL]. (2015-11-10)[2018-10-25]. <http://www.defra.gov.uk/environment/water/quality/nitrate/pdf/consultation-supportdocs/d1-nitrateswater.pdf>, 2007.
- [20] Kuhne C C. Federal Water Pollution Control Act Amendments of 1972[J]. *Public Health Reports*, 1976, 77(2):107.
- [21] Holst A. Clean Water Act. Encyclopædia Britannica[EB/OL]. (2015-5)[2018-10-25]. <https://www.britannica.com/topic/Clean-Water-Act>.
- [22] Adler R W, Landman J C, Cameron D M. The Clean Water Act 20 years later[M]. Washington, DC: Island Press, 1993.
- [23] House U S C. Federal Water Pollution Control Act[J]. *Environmental Policy Collection*, 2012, 77(2):107-113.
- [24] Copeland C. Clean Water Act: A summary of the law[R]. Washington, DC, Congressional Research Service, 2010.
- [25] 尹志军. 美国环境法史论[D]. 北京:中国政法大学, 2005.
- YIN Zhi-jun. The history of American Environmental Law [D]. Beijing: China University of Political Science and Law, 2005.
- [26] Bai Z H, Lu J, Zhao H, et al. Designing Vulnerable Zones of nitrogen and phosphorus transfers to control water pollution in China[J]. *Environmental Science & Technology*, 2018, 52(16):8987-8988.
- [27] Wang M, Ma L, Stokal M, et al. Hotspots for nitrogen and phosphorus losses from food production in China: A county-scale analysis[J]. *Environmental Science & Technology*, 2018, 52(10):5782-5791.