

DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdtqk.2019.0090

张晓楠,邱国玉. 化肥对我国水环境安全的影响及过量施用的成因分析[J]. 南水北调与水利科技, 2019, 17(4): 104-114.  
ZHANG X N, QIU G Y. Causes of excessive use of chemical fertilizer and its impacts on China's water environment security [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2019, 17(4): 104-114. (in Chinese)

# 化肥对我国水环境安全的影响及过量施用的成因分析

张晓楠<sup>1,2</sup>, 邱国玉<sup>1</sup>

(1. 北京大学 深圳研究生院 环境与能源学院, 深圳 518055; 2. 中国环境规划院, 北京 100012)

**摘要:**我国是世界上化肥施用量最大的国家,化肥施用强度高且利用率低。统计我国化肥施用量与施用强度的数据,与主要发达国家的情况进行对比分析,结果表明:我国农用化肥施用折纯量近30年来增长了3.4倍,氮、磷肥施用强度是发达国家的3~5倍,化肥施用利用效率不到发达国家的50%。化肥过量施用导致地表水富营养化和地下水硝酸盐污染等水环境问题。农业生产对化肥的过度依赖和面源污染法律制度约束的缺失是造成化肥过量施用并成为面源污染的主要成因。建议通过建立环境质量与国家农业支持保护补贴、土地承包权和经营权挂钩的制度约束,控制化肥过量施用;同时引导大众参与,促进消费升级,由市场需求倒逼农业生产者采取环保措施,减少农业面源污染,从而实现粮食安全与水环境安全的协调发展。

**关键词:**农业;面源污染;粮食安全;富营养化;地下水;硝酸盐

中图分类号:X592 文献标志码:A 开放科学(资源服务)标识码(OSID):



## Causes of excessive use of chemical fertilizer and its impacts on China's water environment security

ZHANG Xiaonan<sup>1,2</sup>, QIU Guoyu<sup>1</sup>

(1. School of Environment and Energy, Peking University, Shenzhen 518055, China;  
2. Chinese Academy of Environmental Planning, Beijing 100012, China)

**Abstract:** China is the largest consumer of chemical fertilizer in the world, with high application intensity and low utilization efficiency. In this study, we analyzed the data of China's chemical fertilizer consumption amount and application intensity, and compared them with the situation of major developed countries. The results are as follows: In the recent 30 years, the amount of agricultural fertilizer applied in China increased by 3.4 times, and the application intensity of nitrogen and phosphorus fertilizer was 3-5 times of that in developed countries, but the utilization efficiency of chemical fertilizer was less than 50% of that in developed countries. The overuse of chemical fertilizer has caused water environment problems such as eutrophication of surface water and nitrate contamination of groundwater. The excessive use of chemical fertilizer has led to non-point source pollution. Its main causes are the over reliance of agricultural production on chemical fertilizer and the lack of legal constraints on non-point source pollution. We recommend that the excessive application of chemical fertilizer be controlled by the establishment of a system that encompasses subsidies on environmental quality and national agricultural support and protection and linking of land contracting rights to management rights. Public participation should be encouraged to promote consumption upgrading, so that market demands will force agricultural producers to adopt environmental measures and reduce agricultural non-point source pollution; thus, coordinated development of food security and water environment security will be achieved.

**Key words:** agriculture; non-point source pollution; food security; eutrophication; groundwater; nitrate

收稿日期: 2019-01-23 修回日期: 2019-06-05 网络出版时间: 2019-06-06  
网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20190605.1145.002.html>  
基金项目: 深圳市技术创新计划技术攻关项目(JCYJ20180504165440088)  
作者简介: 张晓楠(1981—),女,河南南阳人,助理研究员,博士,主要从事水污染防治与环境规划方面研究。E-mail: xnzhang99@163.com  
通信作者: 邱国玉(1963—),男,内蒙古阿拉善人,教授,博士生导师,主要从事水资源与水环境、生态水文方面研究。E-mail: qiugy@pkusz.edu.cn

现代农业的发展是以大量化肥农药的投入为基础,化肥施用带来的粮食产出养活了约一半的地球人口<sup>[1]</sup>。我国在改革开放后成功完成了由粮食依赖进口向粮食自给自足的转变,解决了 13 亿人口的温饱,这一巨大成就得益于以大量矿物源化肥施用为基础的现代农业发展。然而化肥会对环境产生负面影响,大量化肥的施用一方面保证了我国的粮食供应,另一方面未被作物利用的养分通过淋溶、挥发等途径流失进入土壤、水体和大气环境中,造成环境污染。了解化肥过量施用对水环境安全的影响及其过量施用的成因,是控制农业面源氮、磷排放,减少水体污染的前提,对实现我国粮食安全、农田可持续利用与水环境安全的协调发展有着重要意义。

### 1 我国化肥施用现状

氮肥是我国主要消费的化肥种类,约占化肥施

用总量的 40%;其次为复合肥,约占 35%;磷肥和钾肥较少,分别占比约为 15%和 10%。从养分比例来看,氮磷钾比例为 1:0.49:0.42,化肥磷钾养分比例高于世界平均水平,趋于发达国家的比例水平 1:0.5:0.5<sup>[2]</sup>。我国自 20 世纪初引进化肥后,施用量逐年增加,至 20 世纪 80 年代成为世界上化肥施用量最多的国家。联合国粮食与农业组织的统计数据示,2008 至 2013 年我国年均化肥施用量是美国的 3 倍,几乎相当于排名前十位的其它国家的施用量总和<sup>[3]</sup>。近 30 年来,我国农用化肥施用量与主要作物产量增长基本成正比,见图 1。30 年间农用化肥施用折纯量增长了 3.4 倍,2015 年我国农用化肥施用折纯量达到 6 022.6 万 t。与此相反的是,许多农业高集约化国家纷纷采取农业总量控制措施降低氮、磷肥施用量。自 20 世纪 80 年代以来,西欧各国氮、磷化肥用量分别下降了大约 30%和 50%<sup>[4]</sup>。

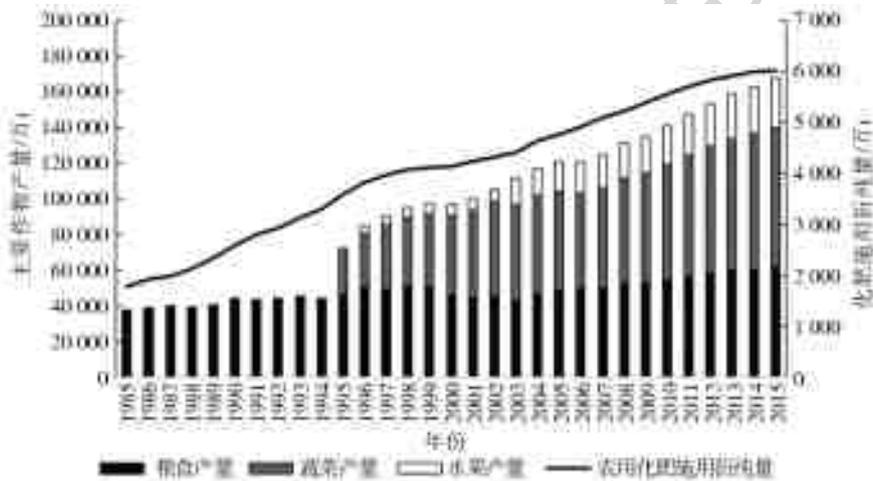


图 1 1985—2015 年我国农用化肥施用量与主要作物的产量变化(数据来源:国家统计局)

Fig. 1 Fertilizer consumption and crops yield in China in 1985 to 2015(Data are from National Bureau of Statistics)

我国化肥施用不仅总量大,且施用强度高。2015 年,单位播种面积化肥施用折纯量超过 360 kg/hm<sup>2</sup>。图 2 是我国与主要发达国家氮肥、磷肥施用强度对比<sup>[5]</sup>。从图中可以看出,2002 年至 2010 年间我国氮肥、磷肥的施用强度分别从 223.6 kg/hm<sup>2</sup>、

76.9 kg/hm<sup>2</sup> 增长到 278.4 kg/hm<sup>2</sup>、134.5 kg/hm<sup>2</sup>,分别增长了 1.2 倍和 1.7 倍。日本的氮肥施用强度则从 111.5 kg/hm<sup>2</sup> 下降到 99.4 kg/hm<sup>2</sup>,磷肥施用强度虽然在本世纪初高达到 133.5 kg/hm<sup>2</sup>,但却在 9 年间下降了 31%。美国的氮肥和磷肥施用强度基

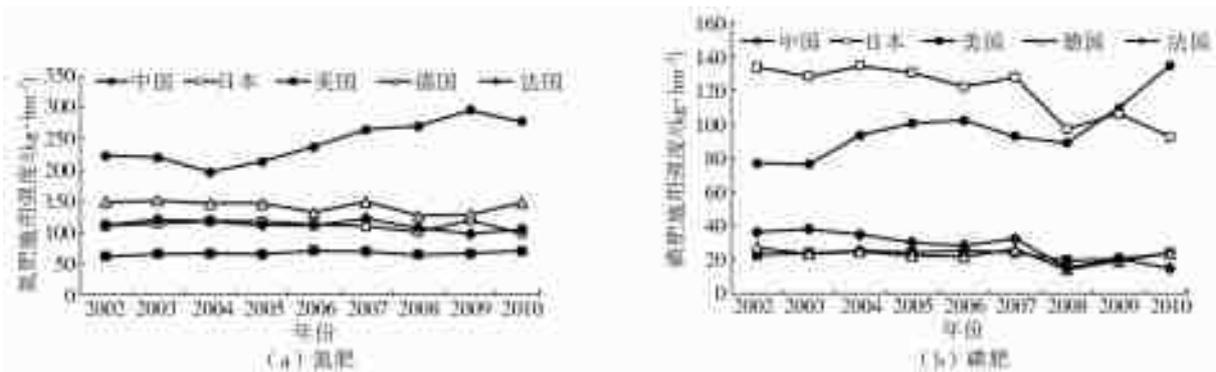


图 2 我国与主要发达国家氮肥、磷肥施用强度对比

Fig. 2 Comparison of nitrogen and phosphate fertilizers application intensity between China and developed countries

本维持在  $65 \text{ kg/hm}^2$  和  $23 \text{ kg/hm}^2$ ；德国和法国的氮肥施用强度在  $150 \text{ kg/hm}^2$  和  $110 \text{ kg/hm}^2$ ，磷肥施用强度分别从 2002 年的  $27.3 \text{ kg/hm}^2$  和  $36.4 \text{ kg/hm}^2$  下降至 2010 年的  $23.8 \text{ kg/hm}^2$  和  $15.2 \text{ kg/hm}^2$ 。

我国大量施用化肥的同时，化肥的有效利用率却不高。目前，氮肥的利用率仅为  $30\% \sim 40\%$ ，磷肥为  $10\% \sim 20\%$ ，钾肥  $35\% \sim 50\%$ 。在蔬菜、花卉、水果等作物上，有些地区甚至出现氮磷肥利用率仅  $10\%$  的现象。相比之下，发达国家的氮利用率可以达到  $70\% \sim 80\%$ <sup>[6-9]</sup>。作为世界上最大的氮肥消耗国，有一半的氮肥直接挥发掉，还有  $5\% \sim 10\%$  流失<sup>[10]</sup>。

## 2 化肥过量施用对我国水环境的影响

### 2.1 化肥施用对地表水富营养化的影响

化肥中的氮、磷元素随地表径流进入河流、湖泊，使水体内氮、磷等营养元素富集，造成水体富营养化。氮、磷是引起水体富营养化的关键因素，对于湖泊、水库等封闭性水域，当水体无机态总氮含量大于  $0.2 \text{ mg/L}$ 、磷酸盐浓度达到  $0.02 \text{ mg/L}$  时，就有可能引起藻华现象的发生<sup>[11]</sup>。研究表明，农田氮、磷流失是引起水体富营养化的重要原因<sup>[12-13]</sup>，而磷是水体富营养化的主要限制因子<sup>[14-16]</sup>。欧美一些农田管理试验证明，即便是在点源排放磷不断减少的情况下，由于来源农业的磷存在，仍无法改变湖泊富营养化的趋势<sup>[17]</sup>。意大利一项持续 15 年的农田试验发现，相比有机肥，磷在化肥施用的土壤中更易流失进入水体<sup>[18]</sup>。

1980—2010 年，由于化肥用量的迅速增长和养殖业的发展，氮、磷发生量在我国重要流域平均增加了 10 倍和 12 倍<sup>[19]</sup>。2004 年水利部完成的全国地表水水质调查评价结果显示，农田径流（主要为化肥使用量和流失量）、城镇地表径流、农村生活污水及生活垃圾污染、水土流失、分散式禽畜养殖等 5 大类非点源污染负荷对总氮、总磷入河总量的贡献比例高达  $67\%$  和  $63\%$ <sup>[20]</sup>。阎伍玖等人对巢湖流域农业活动的研究表明来源于地表径流、水土流失等非点源排放总氮、总磷占入湖总量比例的  $69.5\%$  和  $51.7\%$ <sup>[21]</sup>。郭慧光等人对滇池富营养化的研究发现农业面源排放占流域总氮、总磷排放总量的  $53\%$  和  $42\%$ <sup>[22]</sup>。万晓红<sup>[23]</sup>、张维理<sup>[24]</sup> 等人对太湖流域的研究表明，农田来源的氮、磷排放分别占流域排放总量的  $29\% \sim 32\%$  和  $3\% \sim 19\%$ 。蔡金洲等对三峡库区的农业面源污染解析表明，种植业氮、磷排放占区域农业面源总氮、总磷排放的  $61\%$  和  $62\%$ <sup>[25]</sup>。

化肥已成为我国地表水体氮、磷的主要来源，在部分地区其贡献率已接近和超过来自城市生活污水和工业的点源排放，是引起我国地表水富营养化的主要因素。

事实上，20 世纪 80 年代，全国尚有不少贫营养的湖泊与水库，至 2000 年几乎所有的湖泊和水库均为中营养以上状况<sup>[20]</sup>。2016 年，全国 118 个主要湖泊中，25 个处于中营养状态，93 个处于富营养状态，富营养状态湖泊占评价湖泊总数的  $78.6\%$ 。943 座主要水库中，中营养状态的水库有 671 座，富营养状态的水库 272 座，占评价水库总数的  $28.8\%$ <sup>[26]</sup>。

### 2.2 化肥施用对地下水硝酸盐污染的影响

研究表明，各类氮肥将最终转化成硝酸盐<sup>[27]</sup>，硝酸根 ( $\text{NO}_3^-$ ) 离子是其主要形式。由于硝酸根 ( $\text{NO}_3^-$ ) 离子带负电荷难以和带有负电荷的土壤颗粒相结合，因而在土壤中的移动性较高，易于淋失到地下水和地表水中。氮肥的大量施用使得农田土壤氮素开始盈余，且盈余量越来越大。旱作条件下，高量施氮作物收获后盈余的氮素多以  $\text{NO}_3^- \text{-N}$  的形态残留在土壤中，最终会随大的降雨淋失进入地下水造成污染<sup>[28-31]</sup>。而施氮肥地区的氮流失量比不施地区高出  $3 \sim 10$  倍<sup>[7]</sup>。地下水硝酸盐  $\delta^{15}\text{N}$  的稳定同位素溯源分析表明，化肥是地下水硝酸盐的主要来源<sup>[32-33]</sup>。20 世纪 90 年代以来，相关的研究成果逐渐增多。许多学者对主要农业生产区的地下水硝态氮污染问题开展了大量调查。结果显示，主要农业产区地下水硝态氮污染情况严重，多地都发现了地下水硝态氮含量超过饮用水标准的现象（表 1）。化肥的过量施用是我国地下水硝酸盐污染的主要原因<sup>[34-37]</sup>。

诸多研究的共同结论是“地下水硝酸盐含量与氮肥施用量直接相关”。一般来讲，不同农田利用类型地下水硝酸盐含量不同。设施菜田 = 花卉 > 果园 > 露天菜地 > 粮田<sup>[33,38-40,42,46,48]</sup>。张维理的调查显示，凡是年施氮量超过  $500 \text{ kg/hm}^2$  而作物氮素吸收量与施氮量之比低于  $40\%$  的地区，地下水硝酸盐含量基本上全部超标<sup>[38]</sup>。

事实上，“三氮”已成为我国自然水体尤其是地下水的主要污染因子<sup>[49]</sup>。2016 年的监测数据显示，我国浅层地下水水质总体较差，2 104 个监测点水质综合评价为优良、良好的比例仅占  $24\%$ 。“三氮”污染情况较重<sup>[26]</sup>。对全国 31 个省（区、市）225 个地市级行政区的中深层地下水监测也显示“三氮”为主要超标指标<sup>[50]</sup>。化肥的过量施用是我国地下水“三氮”污染的主要原因。

表 1 我国主要农业生产区地下水硝态氮污染情况的研究结果汇总

Tab. 1 Summary of research results on groundwater nitrate pollution in major agricultural production areas of China

地区	采样时间	样点数量	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -N质量浓度/(mg·L <sup>-1</sup> )		超标率/%		备注	来源	
			均值	最高	10 mg/L	20 mg/L			
环渤海省市	1993年10月			300.00		(>50)*	北京、天津、河北、山东四省	张维理等 <sup>[38]</sup>	
	1994年3—6月								
	2005年6月	1 139	11.90	222.40		17.70 (34.1)*	北京、河北、河南、山东、辽宁、天津以及山西七省	赵同科等 <sup>[39]</sup>	
北京市	1999年11月—	145	5.16	38.15	13.8	6.90	井深120~200 m	刘宏斌等 <sup>[37]</sup>	
	2000年10月	336	5.98	45.82	24.1	8.60	井深70~100 m		
			41	14.01	85.42	46.3	31.70	井深60~20 m	杜连凤等 <sup>[40]</sup>
			77	47.53	181.90	80.5	66.20	井深3~6 m	
	2004年10月—	22	5.00	33.40	13.6	4.50	粮田		
	2005年12月	34	9.30	76.30	23.5	8.80	果园		
		29	13.80	48.10	44.8	24.10	菜田		
		22	15.00	38.80	63.6	22.70	居民区		
	2005年6月	71	5.40	71.90		2.80		赵同科等 <sup>[39]</sup>	
河北省	1959年		2.35					张光辉等 <sup>[41]</sup>	
	1978年		15.90						
	1988年		39.90						
	1995年		46.50						
	2000年		54.90						
	2005年		56.20						
	2005年6月	210	7.20	36.90		4.70		赵同科等 <sup>[39]</sup>	
桓台县	2005年6月	253	18.90	87.70		36.80		赵同科等 <sup>[39]</sup>	
	2009年7月	410	7.40	40.50	20.70	2.00		林海涛等 <sup>[42]</sup>	
	2002年10月	394	8.08	79.74			潜水	陈淑峰等 <sup>[43]</sup>	
		283	3.87	41.16			承压水		
	2007年10月	394	14.68	73.21			潜水		
		283	7.19	53.37			承压水		
山东省	2003—2004年		22.60	178.00				董章杭等 <sup>[44]</sup>	
	2003年9月下旬	98	29.20	178.00					
	2003年12月下旬	169	25.50	129.00	59.90	37.30			
	2004年4月中旬	188	11.20	74.10					
	2004年7月中旬	198	24.60	115.00					
惠民县	2004年4月	653	121.60	279.60		(87)*		张丽娟等 <sup>[45]</sup>	
	2005年4月								
潍坊市			56	28.10	150.00	73.20	48.30	徐春英等 <sup>[33]</sup>	
			26	33.10	150.00	73.10	46.20		
			34	23.30	150.00	73.50	50.00		
			12	32.10	51.30	100.00	66.70		
	2009年9—10月	13	61.40	150.00	100.00	92.30	灌溉井水 饮用井水 露地蔬菜 温室蔬菜		
		19	11.40	26.20	57.90	15.80	小麦-玉米种植		
		12	14.70	150.00	73.20	48.20	大豆、棉花、果树等的种植区以及畜禽养殖区、居民生活区		
天津市	2005年6月	103	13.00	110.50		20.40			
辽宁省	2005年6月	175	15.10	122.60		22.20			
山西省	2005年6月	111	7.40	79.70		9.90			
河南省	2005年6月	223	9.50	222.40		11.60			
甘肃省	2007年5、6月	71	10.66	73.82	32.40	16.90		杨荣等 <sup>[46]</sup>	

续表

地区	采样时间	样点数量	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -N 质量浓度/(mg·L <sup>-1</sup> )		超标率/%		备注	来源
			均值	最高	10 mg/L	20 mg/L		
滇池流域	2002 年	100	28.30	38.40		70.0		高阳俊等 <sup>[47]</sup>
	2004 年 3 月	41	26.93	326.00	24.4	34.1		史静等 <sup>[48]</sup>
	2012 年 5 月	14	45.77				耕地	黄强盛等 <sup>[32]</sup>

注：\* 表示大于 50 mg/L；超标限值参考我国《地下水质量标准（GB/T 14848—93）》III 类水标准硝酸盐（以 N 计）≤20 mg/L；《生活饮用水卫生标准（GB 5749—2006）》10 mg/L（以 N 计，水源受限地区为 20 mg/L）。

### 3 我国化肥过度施用的成因分析

#### 3.1 农业生产对化肥过度依赖

化肥提供了作物生长必需的营养元素，能够促进植物生长，对提高农作物产量有着巨大作用。世界粮食产量的增加约有 25%~40% 是靠化肥投入取得，发达国家甚至可高达 50%~60%<sup>[51,52]</sup>。联合国粮农组织的数据显示，世界上三分之一的谷物产量是由化肥贡献的<sup>[53]</sup>。

我国长期以来对粮食产量的追求和有机肥施用量的减少，导致了农业生产对化肥的过度依赖，结果导致化肥的过量施用成为普遍现象。我国施用最多的是氮肥，其次是磷肥和钾肥，微量元素肥料极少单独使用。1949 年我国粮食单位面积产量仅有 1 029 kg/hm<sup>2</sup>，到 2015 年粮食单产增至 5 483 kg/hm<sup>2</sup><sup>[54]</sup>，是建国初期的 5 倍。产量的提高与化肥的普及和大量使用是密不可分的。

以氮肥为例，各地为确保高产、高收益，过量施肥的现象十分普遍，尤其以北方设施蔬菜种植为高。张维理的调查显示，河北省玉田县范庄在甘蓝-芹菜二茬轮作的菜地氮肥年用量以纯氮计高达 1 894 kg/hm<sup>2</sup><sup>[38]</sup>。北京市保护地菜田全年氮肥用量高达 1 732 kg/hm<sup>2</sup>，相当于蔬菜氮素吸收量的 4.47 倍<sup>[55]</sup>。山东省设施蔬菜氮肥用量高达 1 351 kg/hm<sup>2</sup><sup>[56]</sup>。董章杭对蔬菜输出基地山东寿光的调查显示，茄子、番茄、黄瓜和韭菜种植上的年化学纯氮施用量分别高达 1 882.8、2 052.5、1 843.3 和 863.0 kg/hm<sup>2</sup><sup>[44]</sup>。林海涛等在 2005 年对山东省寿光市不同作物类型的施氮量所做的调查显示，设施蔬菜 12 个样点全年通过化肥、有机肥带入的氮平均高达 2 810 kg/hm<sup>2</sup>，露地蔬菜全年施氮量在 690 kg/hm<sup>2</sup>，果树施氮量在 1 130 kg/hm<sup>2</sup><sup>[42]</sup>。许多粮食作物的氮肥施用量也超过 500 kg/hm<sup>2</sup>，以华北主要粮食产区的小麦-玉米轮作一年两茬为例，桓台县氮肥年均施用量达 650 kg/hm<sup>2</sup><sup>[43]</sup>，寿光市年均施用

量 510 kg/hm<sup>2</sup><sup>[42]</sup>。

#### 3.2 法律等制度约束普遍不足

导致化肥过度施用的另一主要原因是缺乏相应的法律制度约束。由于环境污染对于农业生产行为的外部性，农户在生产过程中没有减少污染的主观意愿，加上改革开放后土地承包制 15 年、30 年的承包周期使农户对土地收益预期短视，以大量施用短期见效快的化肥来获取土地短期产出的提高。一些地区为了公平，承包土地频繁轮转，“三年一小调，五年一大调”，更是加剧了对土地的掠夺式使用。只要购买化肥的支出小于其所能带来的作物增产增加的收益，农民就会不断地增加使用量<sup>[57]</sup>。因此，需要相应的法律法规来约束农户生产行为带来的污染排放。

然而，我国目前并没有一部具体针对农业生态保护和面源污染防治的法律法规。我们梳理了现有法律体系中涉及面源污染的条文，结果汇总于表 2。可以看到，相关法条规定普遍较为宏观，对污染的相关法律责任的规定也不够明确。《农业法》、《农产品质量安全法》、《环境保护法》和《水污染防治法》等法律虽然都在宏观上提出了合理施用化肥，防止农业面源污染，然而对如何“合理使用化肥”、如何“科学合理施用农药、化肥等农业投入品”，怎样“防止农用地的污染”、“防止对农产品产地造成污染”、防止和防治“农业面源污染”，并没有配套的规章和规范性文件具体规定。由于没有系统配套的规章制度，这些法律规定缺乏一定的可操作性。《水污染防治法》第九条虽明确提出各主管部门在职责范围内对有关水污染防治实施监督管理，但农业部门却并没有对农业面源污染的具体监管措施规定。

另外，农业有关法律的法条大多是从农产品安全角度出发，缺乏对环境污染的关注。例如，《农业法》明确要求县级以上人民政府农业行政主管部门“对耕地质量进行定期监测”，却并不涉及环境污染，更没有明确污染责任。2017 年 6 月新修订的《水污染防治法》，虽然明确提出了“制定农药、化肥的质量

标准和使用标准,应当适应水环境保护要求”,但并未明确相应标准制定的责任主体。另一方面,化肥的质量标准和使用标准从制定到推广,再到农业生产者普及,仍需要漫长的时间。

表 2 我国有关农业环境保护和化肥面源污染的法律条文

Tab. 2 Legal provisions related to agricultural environmental protection and non-point source pollution of fertilizer in China

法律名称	主要条文	颁布实施时间
农业法	第五十八条 农民和农业生产经营组织应当保养耕地,合理使用化肥、农药、农用薄膜,增加使用有机肥料,采用先进技术,保护和提高地力,防止农用地的污染、破坏和地力衰退。县级以上人民政府农业行政主管部门应当采取措施,支持农民和农业生产经营组织加强耕地质量建设,并对耕地质量进行定期监测。 第六十六条 县级以上人民政府应当采取措施,督促有关单位进行治理,防治废水、废气和固体废弃物对农业生态环境的污染。排放废水、废气和固体废弃物造成农业生态环境污染事故的,由环境保护行政主管部门或者农业行政主管部门依法调查处理;给农民和农业生产经营组织造成损失的,有关责任者应当依法赔偿。	1993年7月通过 2002年12月修订 2009年第一次修正 2012年12月第二次修正 2013年1月1日起施行
农产品质量安全法	第十九条 农产品生产者应当合理使用化肥、农药、兽药、农用薄膜等化工产品,防止对农产品产地造成污染。	2006年4月通过 2006年11月1日起施行
环境保护法	第三十三条 各级人民政府应当加强对农业环境的保护,促进农业环境保护新技术的使用,加强对农业污染源的监测预警,统筹有关部门采取措施,防治土壤污染和土地沙化、盐渍化、贫瘠化、石漠化、地面沉降以及防治植被破坏、水土流失、水体富营养化、水源枯竭、种源灭绝等生态失调现象,推广植物病虫害的综合防治。 第四十九条 各级人民政府及其农业等有关部门和机构应当指导农业生产经营者科学种植和养殖,科学合理施用农药、化肥等农业投入品,科学处置农用薄膜、农作物秸秆等农业废弃物,防止农业面源污染。 禁止将不符合农用标准和环境保护标准的固体废物、废水施入农田。施用农药、化肥等农业投入品及进行灌溉,应当采取措施,防止重金属和其他有毒有害物质污染环境。	1989年12月通过 2014年4月修订 2015年1月1日起施行
水污染防治法	第三条 水污染防治应当坚持预防为主、防治结合、综合治理的原则,优先保护饮用水水源,严格控制工业污染、城镇生活污染,防治农业面源污染,积极推进生态治理工程建设,预防、控制和减少水环境污染和生态破坏。 第九条 县级以上人民政府水行政、国土资源、卫生、建设、农业、渔业等部门以及重要江河、湖泊的流域水资源保护机构,在各自的职责范围内,对有关水污染防治实施监督管理。 第五十三条 制定化肥、农药等产品的质量标准和使用标准,应当适应水环境保护要求。 第五十五条 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,推广测土配方施肥技术和高效低毒低残留农药,控制化肥和农药的过量使用,防止造成水污染。 第七十三条 国务院和省、自治区、直辖市人民政府根据水环境保护的需要,可以在饮用水水源保护区内,采取禁止或者限制使用含磷洗涤剂、化肥、农药以及限制种植养殖等措施。	1984年5月通过 1996年5月第一次修正 2008年2月修订 2017年6月第二次修正 2018年1月1日起施行

从法规层面上看,涉及化肥的生产和销售方面有一系列规章和规范性文件,有较具体的规定形成完备的管理制度,如《肥料登记管理办法》、《肥料登记资料要求》等。其中《肥料登记管理办法》在2017年12月进行了第二次修订,虽然在第一条就提出为了“保护生态环境”制定本办法,但仍没有针对化肥不当施用带来的面源污染问题的具体条文规定。2010年环保部发布了《化肥使用环境安全技术导则(HJ 555—2010)》作为标准推广,规定了化肥环境安全使用的原则、污染控制技术措施和管理措施等相关内容,虽然对农业种植化肥安全使用有一定指导意义,但该标准以原则性推荐为主,对于具体技术细节没有量化的规范,也不涉及污染处罚等责任规定。2016年5月国务院印发了《土壤污染防治行动计划》,在此基础上,环境保护部和农业部于2017年

9月联合发布了《农用地土壤环境管理办法(试行)》,2018年11月又印发了《农业农村污染治理攻坚战行动计划》,均强调了推进测土配方施肥、有机肥替代、减少化肥施用量等,虽充分显示了国家对减少农业生产污染的决心,但操作层面的具体规定依然未见出台。

相比之下,发达国家的水污染防治体系则有着较为全面的法律法规保障。如美国的《清洁水法》(Clean Water Act, 1977),明确了控制污水排放的各项标准、规定。涉及饮用水安全保护有《安全饮用水法》(Safe Drinking Water Act, 1974)。其它一些法律法规也对水环境保护保驾护航,如《联邦杀虫剂、杀菌剂和灭鼠剂法》(Federal Insecticide, Fungicide, and Rodenticide Act, 1947)对杀虫剂作了罗列式规定以减少对水环境的影响;《资源保护和回收

法》(Resource Conservation and Recovery Act, 1967)通过对固体废弃物的处置规定,客观上预防因对土地的污染而可能发生的地下水污染;《有毒物质管理法》(Toxic Substances Control Act, 1976)通过对化学物品和农药等的生产、流通及使用进行监控来实现对地下水的保护<sup>[58]</sup>。对于已污染地下水,《环境综合治理、赔偿和责任法》(Environment management, Compensation and Liability Act, 1980)通过政府建立的信托基金,治理受污染场地和地下水,因此被称为超级基金(Superfund)。该基金自 1980 年实施以来,已投入了超过 350 亿美元,清理了近 400 个污染场地<sup>[59]</sup>。

总体而言,我国目前针对农业生态环境保护和农业面源污染防治的法律体系处于缺失状态。现有法律法规中涉及农业面源的条款普遍宏观抽象,可操作性不强,没有污染责任的相关规定,难以起到惩戒作用。这种“无法可依”或“有法难依”状态,成为化肥过量施用带来面源污染的重要制度诱因。

#### 4 对 策

化肥过量施用对水环境安全造成严重影响,而肥料对农业生产又至关重要。控制化肥过量施用的最直接的办法是加强耕地施肥管理,开展科学施肥,同时完善相关法律法规制度,出台针对农业生态保护和面源污染防治的法律法规,明确污染责任,从法律层面对化肥过量施用进行约束。

(1)加强农村水环境质量监测,建立环境质量与国家农业支持保护补贴、土地承包权和经营权挂钩的法律法规制度约束。近年来,国家出台一系列政策措施,“促进农业农村发展由过度依赖资源消耗、主要满足量的需求,向追求绿色生态可持续、更加注重满足质的需求转变”,耕地地力保护是农村土地“三权分置”、农业三项补贴改革、供给侧结构性改革的重要目标。党的十九大报告中又明确指出“保持土地承包关系稳定并长久不变,第二轮土地承包到期后再延长 30 年”。长期稳定的农地产权,能够使农民重视土地的休养生息,更愿意采用农家肥等方式耕种土地,减少化肥的使用<sup>[60]</sup>。因此,应当建立农村水环境监测体系,充分发挥环保、水利、国土等部门的现有站点的监测力量,设立统一监管部门。同时,使用遥感、无人机等先进监测手段,开展农作物营养状况、肥料施用状况实时监测,完善农村水环境质量监测体系,将水环境质量作为国家农业支持保护补贴的重要参考依据,在承包期、经营期内对水环境质量开展定期监测考评和通报,对水环境质量

不达标或恶化的土地所有集体、承包者或租赁者采取警告至取消其经营权的处罚,促使农业生产者合理施用化肥,降低污染排放。

(2)加大可持续农业宣传与认证,引导消费者参与和购买绿色农产品、有机农产品。我国从 20 世纪 70 年代逐渐开展测土配方施肥技术的推广,近年国家又出台了一系列方案促进化肥的减量。2015 年,农业部印发了《到 2020 年化肥使用量零增长行动方案》,为了配合把过量使用的化肥尽快减下来的要求,财政部、海关总署和国家税务总局联合印发了《关于对化肥恢复征收增值税政策的通知》,对有机肥在生产流通全环节实行免征增值税政策,鼓励有机肥的生产和使用,优化用肥结构。在此基础上,建议对绿色农产品、有机农产品进行适当消费补贴,推动消费升级。使人民群众逐渐认可不施用、合理施用化肥农药的优质农产品,形成环保可持续的消费意识。由市场需求倒逼农业生产者采取环保措施,科学使用化肥或有机肥代替化肥,深入推进测土配方施肥,使用节水灌溉等技术减少肥料淋滤。逐渐形成生产者的新价值观,通过合理施用有机肥,主动提高土壤有机质含量,改善土壤结构,提高农产品质量,减少化肥带来的氮、磷排放,保护农业生态环境。对于已污染地区,及时开展治污措施,并加大宣传、教育和补贴力度,促进水环境改善和恢复。

#### 5 结 语

我国是世界上化肥施用量最大的国家,施用效率却远低于许多发达国家。化肥对水质的影响主要表现在两个方面:一是造成地表水富营养,氮、磷等元素通过径流进入地表水中,使水体中氮、磷含量增加,藻类迅速生长繁殖,消耗大量的溶解氧,导致水体丧失应有功能,造成水体富营养化;二是造成地下水硝酸盐污染,残留在土壤中的盈余氮素以硝态氮的形态通过淋溶渗漏进入地下水,导致地下水硝酸盐含量增加。化肥的过量、不合理施用是我国地表水富营养化、地下水硝酸盐污染的主要贡献源,总磷和“三氮”是现阶段我国水环境的主要污染因子。

我国农业生产长期以来以产量为导向,过度依赖于化肥等农用投入品,加上农业面源污染控制法律法规约束的缺失,使化肥过量施用成为面源污染的主要贡献源。虽然国家出台了一系列措施促进农业生产转型和化肥减量,然而,由于农业部门更关注农业生产的发展而非生态环境的保护,而环境保护部门对于农业面源污染又无法开展直接的监管,使目前农业面源污染的监管治理仍处于“无法可依”或

“有法难依”状态。2018年新组建的生态环境部划入了原农业部门的监督指导农业面源污染治理的职责,这一状况正在逐渐得以改善。建议建立环境质量与国家农业支持保护补贴、土地承包权和经营权挂钩的制度约束,同时引导大众参与,促进消费升级,由市场需求倒逼农业生产者采取环保措施,科学使用化肥或有机肥代替化肥。

参考文献(References):

- [1] ERISMAN J W, SUTTON M A, GALLOWAY J, et al. How a century of ammonia synthesis changed the world[J]. *Nature Geoscience*. 2008, 1(10): 636-639.
- [2] 刘钦普. 中国化肥投入区域差异及环境风险分析[J]. *中国农业科学*. 2014, 47(18): 3596-3605. (LIU Q P. Regional differences in fertilizer input and environmental risk analysis in China[J]. *Scientia Agricultura Sinica*. 2014, 47(18): 3596-3605. (in Chinese))
- [3] FAO. Data Inputs Fertilizers[DB/OL]. [2016-11-10]. <http://www.fao.org/faostat/en/#data/RF/visualize>.
- [4] 张维理, 冀宏杰, Kolbe H, 等. 中国农业面源污染形势估计及控制对策 II. 欧美国家农业面源污染状况及控制[J]. *中国农业科学*. 2004, 37(7): 1018-1025. (ZHANG W L, JI H J, KOLBE H, et al. Estimation of agricultural non-point source pollution in China and the alleviating strategies[J]. *Scientia Agricultura Sinica*. 2004, 37(7): 1018-1025. (in Chinese))
- [5] FAO. Agri-Environmental Indicators[DB/OL]. [2013-05-16]. <http://www.fao.org/faostat/en/#data/EF>.
- [6] 张乃明. 环境污染与食品安全[M]. 北京: 化学工业出版社, 2007: 200. (ZHANG N M. Environmental pollution and food safety[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2007: 200. (in Chinese))
- [7] 胡宏祥, 洪天求, 马友华. 农业非点源污染及其防治策略研究[J]. *中国农学通报*. 2005, 21(4): 315-317, 347. (HU H X, HONG T Q, MA Y H. Agricultural non-point source pollution and its tactics of preventing and curing [J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*. 2005, 21(4): 315-317, 347. (in Chinese))
- [8] 陈同斌, 曾希柏, 胡清秀. 中国化肥利用率的区域分异[J]. *地理学报*. 2002, 57(5): 531-538. (CHEN T B, ZENG X B, HU Q X. Utilization efficiency of chemical fertilizers among different counties of China[J]. *Acta Geographica Sinica*. 2002, 57(5): 531-538. (in Chinese))
- [9] 黄国勤, 王兴祥, 钱海燕, 等. 施用化肥对农业生态环境的负面影响及对策[J]. *生态环境*. 2004, 13(4): 656-660. (HUANG G Q, WANG X X, QIAN H Y, et al. Negative impact of inorganic fertilizes application on agricultural environment and its countermeasures[J]. *Ecology and Environment*. 2004, 13(4): 656-660. (in Chinese))
- [10] FAO. World Agriculture: Towards 2015/2030. Summary Report[M]. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2002: 106.
- [11] 司友斌, 王慎强, 陈怀满. 农田氮、磷的流失与水体富营养化[J]. *土壤*. 2000, 005(4): 188-193. (SI Y B, WANG S Q, CHEN H M. Loss of nitrogen and phosphorus in farmland and water eutrophication [J]. *Soils*. 2000, 005(04): 188-193.)
- [12] HESSEN D O, HOLTAN G, HINDAR A, et al. The important significance of nitrogen loss in freshwater and marine eutrophication[J]. *Ambio-A Journal of the Human Environment*. 1997, 26(5): 306-313.
- [13] ABRAMS M M, JARRELL W M. Soil phosphorus as a potential nonpoint source for elevated stream phosphorus levels[J]. *Journal of Environmental Quality*. 1995, 24(1): 132.
- [14] PENN C J, SIMS J T. Phosphorus forms in biosolids-amended soils and losses in runoff: Effects of wastewater treatment process[J]. *Journal of Environmental Quality*. 2002, 31(4): 1349-1361.
- [15] SHARPLEY A N, GBUREK W J, FOLMAR G, et al. Sources of phosphorus exported from an agricultural watershed in Pennsylvania[J]. *Agricultural Water Management*. 1999, 41(2): 77-89.
- [16] TUNNEY H, CARTON O, BROOKES P, et al. Phosphorus loss from soil to water[M]. CAB international, 1997: 467.
- [17] BRIDGHAM S. The Role of agriculture in phosphorus eutrophication of surface water[J]. *Ecological Society of America*. 1998, 79(6): 2215-2216.
- [18] BORDA T, CELI L, ZAVATTARO L, et al. Effect of agronomic management on risk of suspended solids and phosphorus losses from soil to waters[J]. *Journal of Soils and Sediments*. 2011, 11(3): 440-451.
- [19] 彭春瑞. 农业面源污染防控理论与技术[M]. 北京: 中国农业出版社, 2013: 443. (PENG C R. Control of agricultural non-point source pollution: theory and technology[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2013: 443. (in Chinese))
- [20] 周怀东, 彭文启, 杜霞, 等. 中国地表水水质评价[J]. *中国水利水电科学研究院学报*. 2004, 2(4): 21-30. (ZHOU H D, PENG W Q, DU X, et al. Assessment of surface water quality in China[J]. *Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research*. 2004, 2(4): 21-30. (in Chinese))

- [21] 阎伍玖, 鲍祥. 巢湖流域农业活动与非点源污染的初步研究[J]. 水土保持学报. 2001, 15(4): 129-132. (YAN W J, BAO X. Study on agricultural movement of Chaohu Lake basin and nonpoint source pollution [J]. Journal of Soil and Water Conservation. 2001, 15(4): 129-132. (in Chinese))
- [22] 郭慧光, 闫自申. 滇池富营养化及面源控制问题思考[J]. 环境科学研究. 1999, 12(5): 48-49, 64. (GUO H G, YAN Z S. Reflection on eutrophication and non-point source control in Dianchi lake[J]. Research of Environmental Sciences. 1999, 12(5): 48-49, 64. (in Chinese))
- [23] 万晓红, 邱丹, 赵小明. 太湖流域规模畜禽养殖场污染特性的解析[J]. 农业环境与发展. 2000, 64(2): 35-38. (WAN X H, QIU D, ZHAO X M. Analysis of pollution characters of the big animal farms in the Taihu Area[J]. Agro-Environment and Development 2000, 64(2): 35-38. (in Chinese))
- [24] 张维理, 武淑霞, 冀宏杰, 等. 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[J]. 中国农业科学. 2004, 37(7): 1008-1017. (ZHANG W L, WU S X, JI H J, et al. Estimation of agricultural non-point source pollution in China and the alleviating strategies[J]. Scientia Agricultura Sinica. 2004, 37(7): 1008-1017. (in Chinese))
- [25] 蔡金洲, 范先鹏, 黄敏, 等. 湖北省三峡库区农业面源污染解析[J]. 农业环境科学学报. 2012, 31(7): 1421-1430. (CAI J Z, FAN X P, HUANG M, et al. Sources analysis of agricultural non-point source pollution in the Three Gorges Reservoir Area of Hubei Province, China[J]. Journal of Agro-environmental Science. 2012, 31(7): 1421-1430. (in Chinese))
- [26] 水利部. 2016 年中国水资源公报[R]. 北京: 水利部, 2016: 1-9. (The Ministry of water resources of People's Republic of China. 2016 China Water Resources Bulletin[R], Beijing: The Ministry of water resources of People's Republic of China, 2016: 1-9. (in Chinese))
- [27] MARKUS S, WOLFRAM Z, GREGOR P. Viewpoints from BASF: Can technology provide the key to smarter nitrogen use? (Part 1)[EB/OL]. [2016-06-07]. <http://news.agropages.com/News/NewsDetail—18237.htm>.
- [28] 黄绍敏, 宝德俊, 皇甫湘荣. 施氮对潮土土壤及地下水硝态氮含量的影响[J]. 农业环境保护. 2000, 19(4): 228-229, 241. (HUANG S M, BAO D J, HUANG FU X R. Effects of N fertilizer application on content of nitrate-n in soil and underground water[J]. Agro-environmental Protection. 2000, 19(4): 228-229, 241. (in Chinese))
- [29] 巨晓棠, 刘学军, 邹国元, 等. 冬小麦/夏玉米轮作体系中氮素的损失途径分析[J]. 中国农业科学. 2002, 35(12): 1493-1499. (JU X T, LIU X J, ZOU G Y, et al. Evaluation of nitrogen loss way in winter wheat and summer maize rotation system[J]. Scientia Agricultura Sinica. 2002, 35(12): 1493-1499. (in Chinese))
- [30] 刘光栋, 吴文良. 高产农田土壤硝态氮淋失与地下水污染动态研究[J]. 中国生态农业学报. 2003, 11(1): 97-99. (LIU G D, WU W L. The dynamics of soil nitrate nitrogen leaching and contamination of the groundwater in high-yield farm land [J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture. 2003, 11(1): 97-99. (in Chinese))
- [31] 王朝辉, 宗志强, 李生秀, 等. 蔬菜的硝态氮累积及菜地土壤的硝态氮残留[J]. 环境科学. 2002, 23(3): 79-83. (WANG Z H, ZONG Z Q, LI S X, et al. Nitrate accumulation in vegetables and its residual in vegetable fields[J]. Environmental Science. 2002, 23(3): 79-83. (in Chinese))
- [32] 黄强盛, 李清光, 卢玮琦, 等. 滇池流域地下水、河水硝酸盐污染及来源[J]. 地球与环境. 2014, 42(5): 589-596. (HUANG Q S, LI Q G, LU W Q, et al. Characteristics and potential source of nitrate pollution in groundwater and river water in the Dianchi lake basin [J]. Earth and Environment. 2014, 42(5): 589-596. (in Chinese))
- [33] 徐春英, 李玉中, 李巧珍, 等. 山东潍坊地下水硝酸盐污染现状及  $\delta^{15}\text{N}$  溯源[J]. 生态学报. 2011, 31(21): 6579-6587. (XU C Y, LI Y Z, LI Q Z, et al. Nitrate contamination and source tracing from  $\delta^{15}\text{N}$  in groundwater in Weifang, Shandong Province[J]. Acta Ecologica Sinica. 2011, 31(21): 6579-6587. (in Chinese))
- [34] 王继红, 刘景双, 于君宝, 等. 农田生态系统氮、磷肥的环境效应[J]. 吉林农业大学学报. 2003, 25(3): 327-331. (WANG J H, LIU J S, YU J B, et al. A review of researches on environmental effects of n and p fertilizers in agricultural ecosystem[J]. Journal of Jilin Agricultural University. 2003, 25(3): 327-331. (in Chinese))
- [35] 赵林, 王榕树, 林学钰. 地下水中氮的表现形式及其污染的微生物控制[J]. 环境科学学报. 1999, 19(4): 443-447. (ZHAO L, WANG R S, LIN X Y. Existing form of nitrogen and its pollution control by micro-organism in the groundwater[J]. Acta Scientiae Circumstantiae. 1999, 19(4): 443-447. (in Chinese))
- [36] 曹志洪. 施肥与水体环境质量——论施肥对环境的影响(2)[J]. 土壤. 2003, 35(5): 353-363. (CAO Z H.

- Effect of fertilization on water quality-Effect of fertilization on environment quality (2)[J]. *Soils*, 2003, 35(5):353-363. (in Chinese))
- [37] 刘宏斌,李志宏,张云贵,等. 北京平原农区地下水硝态氮污染状况及其影响因素研究[J]. *土壤学报*, 2006, 43(3):405-413. (LIU H B, LI Z H, ZHANG Y G, et al. Nitrate contamination of groundwater and its affection factors in rural areas of Beijing plain[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2006, 43(3):405-413. (in Chinese))
- [38] 张维理,田哲旭,张宁,等. 我国北方农用氮肥造成地下水硝酸盐污染的调查[J]. *植物营养与肥料学报*, 1995, 1(2):82-89. (ZHANG W L, TIAN Z X, ZHANG N, et al. Investagation of nitrate pollution in groundwater due to nitrogen fertilization in agriculture in north China[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 1995, 1(2):82-89. (in Chinese))
- [39] 赵同科,张成军,杜连凤,等. 环渤海七省(市)地下水硝酸盐含量调查[J]. *农业环境科学学报*, 2007, 26(2):779-783. (ZHAO T K, ZHANG C J, DU L F, et al. Investigation on nitrate concentration in groundwater in Seven Provinces (City) Surrounding the Bohai Sea[J]. *Journal of Agro-environmental Science*, 2007, 26(02):779-783. (in Chinese))
- [40] 杜连凤,赵同科,张成军,等. 京郊地区3种典型农田系统硝酸盐污染现状调查[J]. *中国农业科学*, 2009, 42(8):2837-2843. (DU L F, ZHAO T K, ZHANG C J, et al. Investigation on nitrate pollution in soils, groundwater and vegetables of three typical farmlands in Beijing region[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2009, 42(8):2837-2843. (in Chinese))
- [41] 张光辉,刘中培,连英立,等. 河北平原地下水水质变及农药化肥施用量变化影响[J]. *南水北调与水利科技*, 2009, 7(2):50-54. (ZHANG G H, LIU Z P, LIAN Y L, et al. Variation of groundwater quality and influence of pesticide and fertilizer on Hebei plain[J]. *South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology*, 2009, 7(2):50-54. (in Chinese))
- [42] 林海涛,江丽华,宋效宗,等. 山东省地下水硝酸盐含量状况及影响因素研究[J]. *农业环境科学学报*, 2011, 30(2):353-357. (LIN H T, JIANG L H, SONG X Z, et al. Nitrate concentration of groundwater and its affecting factors in Shandong Province, China[J]. *Journal of Agro-environmental Science*, 2011, 30(2):353-357. (in Chinese))
- [43] 陈淑峰,李帷,胡克林,等. 基于GIS的华北高产粮区地下水硝态氮含量时空变异特征[J]. *环境科学*, 2009, 30(12):3541-3547. (CHEN S F, LI W, HU K L, et al. GIS-based analysis of spatio-temporal variability of groundwater nitrate concentration in high-yield region in north China plain[J]. *Environmental Science*, 2009, 30(12):3541-3547. (in Chinese))
- [44] 董章杭,李季,孙丽梅. 集约化蔬菜种植区化肥施用对地下水硝酸盐污染影响的研究——以“中国蔬菜之乡”山东省寿光市为例[J]. *农业环境科学学报*, 2005, 24(6):1139-1144. (DONG Z H, LI J, SUN L M. Nitrate contamination in the groundwater of intensive vegetable cultivation areas in Shouguang City, Shandong Province, China[J]. *Journal of Agro-environmental Science*, 2005, 24(6):1139-1144. (in Chinese))
- [45] 张丽娟,巨晓棠,刘辰琛,等. 北方设施蔬菜种植区地下水硝酸盐来源分析——以山东省惠民县为例[J]. *中国农业科学*, 2010, 43(21):4427-4436. (ZHANG L J, JU X T, LIU C C, et al. Source analysis of nitrate in groundwater of vegetable planting area in north facility: A case study of Huimin County, Shandong Province[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2010, 43(21):4427-4436. (in Chinese))
- [46] 杨荣,苏永中. 黑河中游绿洲农区地下水硝态氮污染调查研究[J]. *冰川冻土*, 2008, 30(6):983-990. (YANG R, SU Y Z. Groundwater nitrate pollution in the oasis agricultural areas in the middle reaches of Heihe River, northwest China[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2008, 30(6):983-990. (in Chinese))
- [47] 高阳俊,张乃明. 滇池流域地下水硝酸盐污染现状分析[J]. *云南地理环境研究*, 2003, 007(4):39-42. (GAO Y J, ZHANG N M. Analysis of nitrate pollution in groundwater of Dianchi lake basin[J]. *Geographic environment of Yunnan Province*, 2003, 007(4):39-42. (in Chinese))
- [48] 史静,张乃明,褚素贞,等. 滇池流域地下水硝酸盐污染特征及影响因素研究[J]. *农业环境科学学报*, 2005, 24(S1):104-107. (SHI J, ZHANG N M, CHU S Z, et al. Groundwater nitrate pollution and the influencing factors in Dianchi watershed[J]. *Journal of Agro-environmental Science*, 2005, 24(S1):104-107. (in Chinese))
- [49] ZHANG X N, GUO Q P, SHEN X X, et al. Water quality, agriculture and food safety in China: Current situation, trends, interdependencies, and management [J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2015, 14(11):2365-2379.
- [50] 环境保护部. 2016年环境状况公报[R]. 北京, 2016: 1-61. (Ministry of Environmental Protection, 2016, 1-61. Report on the State of the Environment in China [R]. MEP, Beijing. (in Chinese))

- [51] 汪建飞,邢素芝. 农田土壤施用化肥的负效应及其防治对策[J]. 农业环境保护, 1998, 17(1): 41-44, 49. (WANG J F, XING S Z. Negative effects of application chemical fertilizers on farmland and the control measures[J]. Agro-environmental Protection, 1998, 17(1): 41-44, 49. (in Chinese))
- [52] 沈景文. 化肥农药和污灌对地下水的污染[J]. 农业环境科学学报, 1992, 11(3): 137-139. (SHEN J W. Pollution of groundwater by chemical pesticides and sewage irrigation[J]. Journal of Agro-environmental Science, 1992, 11(3): 137-139. (in Chinese))
- [53] FAO. FAO Statistical Yearbook 2013[M]. Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2013: 307.
- [54] 国家统计局. 年度数据[DB/OL]. [2017-01-01]. <http://data.stats.gov.cn/easyquery.htm?cn=C01>. (National Bureau of Statistics of China. Annual Data [DB/OL]. [2017-01-01]. <http://data.stats.gov.cn/easyquery.htm?cn=C01>. (in Chinese))
- [55] 刘宏斌,李志宏,张云贵,等. 北京市农田土壤硝态氮的分布与累积特征[J]. 中国农业科学, 2004, 37(5): 692-698. (LIU H B, LI Z H, ZHANG Y G, et al. Characteristics of nitrate distribution and accumulation in soil profiles under main agro-land use types in Beijing[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2004, 37(5): 692-698. (in Chinese))
- [56] 刘兆辉,江丽华,张文君,等. 山东省设施蔬菜施肥量演变及土壤养分变化规律[J]. 土壤学报, 2008, 45(2): 296-303. (LIU Z H, JIANG L H, ZHANG W J, et al. Evolution of fertilization rate and variation of soil nutrient contents in greenhouse vegetable cultivation in Shandong[J]. Acta Pedologica Sinica, 2008, 45(2): 296-303. (in Chinese))
- [57] 魏欣,李世平. 基于农户行为的农业面源污染机制探析[J]. 西北农林科技大学学报(社会科学版), 2012, 12(6): 26-31. (WEI Xin, LI Shi-ping. Analysis of mechanism of agricultural Non-point Pollution based on Farmers' production behaviors. Journal of Northwest A&F University(Social Science Edition), 2012, 12(6): 26-31. (in Chinese))
- [58] 李印. 美国地下水保护立法的借鉴[J]. 广东社会科学, 2012, 033(6): 240-244. (LI Y. Reference of American groundwater protection legislation[J]. Guangdong Social Sciences, 2012, 033(6): 240-244. (in Chinese))
- [59] USEPA. Superfund[EB/OL]. [2018-December 07]. <https://www.epa.gov/superfund>.
- [60] 卢义杰. 土地承包期延长 30 年将给农民带来什么[N]. 中国青年报, 2017-10-20 (3). (LU Y J. What will be brought to farmers by 30 years of extension of the land contract[N]. China Youth Daily, 2017-10-20 (3). (in Chinese))

(上接第 78 页)

- [24] 何兵,高凡,唐小雨等. 基于滑动 Copula 函数的新疆干旱内陆河流水文气象要素变异关系诊断[J]. 水土保持学报, 2019, 26(1): 155-161. (HE B, GAO F, TANG X Y, et al. Diagnosis of variation of the relationship between hydrological and meteorological elements in arid Rnland Rivers of Xinjiang based on the sliding Copula function[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2019, 26(1): 155-161. (in Chinese))
- [25] 李宝玲,李建林,咎明军,等. 河流年径流量的 R/S 灰色预测[J]. 水文, 2015, 35(2): 44-48. (LI B L, LI J L, ZAN M J, et al. R/S grey prediction of river annual runoff[J]. Journal of China Hydrology, 2015, 35(2): 44-48. (in Chinese)) DOI: 10. 3969/j. issn. 1000-0852. 2015. 02. 009.
- [26] SHOAIB M, SHAMSELDIN A Y, KHAN S, et al. A wavelet based approach for combining the outputs of different rainfall-runoff models[J]. Stochastic Environmental Research and Risk Assessment, 2018, 32(1): 155-168. DOI: 10. 1007/s00477-016-1364-x.
- [27] 邵晓梅,许月卿,严昌荣. 黄河流域降水序列变化的小波分析[J]. 北京大学学报(自然科学版), 2006, 42(4): 503-509. (SHAO X M, XU Y Q, YAN C R. Wavelet analysis of rainfall variation in the Yellow River basin. [J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 2006, 42(4): 503-509. (in Chinese))