

Agricultural Non-Point Source Pollution and Health Risk Assessment in Anhui Province

Daping Song, Minhui Pang, Hong Li, Dongsheng Liu, Qiang Zuo*

Institute of Plant Nutrition and Resources, Beijing Academy of Agriculture and Forestry Sciences, Beijing
Email: songping_361@163.com, *zq18189@163.com

Received: May 7th, 2019; accepted: May 23rd, 2019; published: Jun. 6th, 2019

Abstract

Based on the data of chemical fertilizer, livestock and population during 2001~2016 in Anhui province, the amount of agricultural non-point source pollutants emitted was estimated on the basis of the calculation of farmland nitrogen, phosphorus and COD pollution load, water, such as standard pollution index and contribution degree of groundwater nitrate. The results show that the nitrogen and phosphorus pollution load of the whole cultivated land in the province was serious, and the early warning level was in Grade III and above. The pollution of surface water from pollutants to the surface increased from south to north, with the highest in the north and the second in the middle and east. It is estimated that more than 80% of urban groundwater nitrate nitrogen concentration is more than 20 mg·L⁻¹ of the national limit. There is a total of 13 cities whose groundwater health risk index exceeds "1", accounting for 76.5% of the total number of cities, among which Hefei city has the highest risk index, which has reached 3.996. Therefore, attention should be paid to the quality of drinking water.

Keywords

Nitrogen and Phosphorus, Pollution Loading, Risk Level, Nitrate Nitrogen, Health Risk Assessment

安徽省农业面源污染及健康风险评价研究

宋大平, 庞敏晖, 李 红, 刘东生, 左 强*

北京市农林科学院植物营养与资源研究所, 北京
Email: songping_361@163.com, *zq18189@163.com

收稿日期: 2019年5月7日; 录用日期: 2019年5月23日; 发布日期: 2019年6月6日

作者简介: 宋大平(1984-), 男, 河北唐山人, 博士, 助理研究员, 主要从事农业面源污染及环境重金属污染与健康方面的研究。
*通讯作者。

文章引用: 宋大平, 庞敏晖, 李红, 刘东生, 左强. 安徽省农业面源污染及健康风险评价研究[J]. 水资源研究, 2019, 8(3): 290-303. DOI: 10.12677/jwrr.2019.83035

摘要

以安徽省耕地、水体环境保护以及人体健康为出发点,依据2001~2016年安徽省化肥、畜禽养殖以及人口数据,估算安徽省农业面源排放污染物的产生量,在此基础上计算耕地氮、磷和COD污染负荷、水体等标污染指数以及对地下水硝态氮的贡献程度。结果表明,安徽省整体耕地氮素、磷素污染负荷严重,预警级别均在Ⅲ级及以上;污染物对地表水污染呈现由南至北依次增加的趋势,北部最高,中东部次之;氮素会通过淋溶作用进入地下水导致硝态氮浓度升高,根据估算,超过80%的城市地下水硝态氮浓度存在超过 $20\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 的国家限定标准;地下水健康风险指数超过“1”的城市总共13座城市,占城市总数的76.5%,其中合肥风险指数最高,已经达到3.996,应注意饮用水质量。

关键词

氮和磷, 污染负荷, 预警级别, 硝态氮, 健康风险评价

Copyright © 2019 by author(s) and Wuhan University.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

氮素(N)和磷素(P)是地球上生命的必需元素,它作为最主要的限制因子之一控制着很多生态系统的动态平衡。而过多的N和P的排放则会对环境产生不良影响,国内外的许多研究证实,N和P的大量使用,对农田容易造成N和P大量盈余而增加耕地氮素负荷[1][2][3];对地表水的影响容易造成水体富营养化,导致我国各大湖波河流水质下降[4][5][6][7];甚至影响地下水的品质,造成地下水硝态氮的污染[8][9][10],严重威胁着环境和人们的身体健康。

进入21世纪以来,高面源污染风险的蔬菜、果园、花卉等农田和畜禽养殖业在各大流域发展迅速。有研究表明,在中国水体污染严重的区域,农用化肥、农村畜禽养殖和城乡结合部的生活排污是造成耕地、水体及地下水N、P和COD污染的主要原因,其贡献率大大超过来自城市生活污水的点源污染和工业的点源污染[11][12]。在国内外以往的研究中可以看出,对于农业面源污染,针对化肥、畜禽粪便和生活污水单方面污染环境的研究很多,同时针对耕地N和P污染负荷、地表水富营养化以及地下水硝态氮污染等不同的环境载体的研究也很多,而在农业面源污染中某一污染物对整个环境不同环境载体的研究相对较少,从而缺少了对整个环境的综合评价。本研究的主要目的在于,针对农业面源污染中占主要成分的化肥、畜禽粪便和生活污染物中的氮素和磷素,以地级市为评价单元,通过对不同环境载体耕地、地表水以及地下水的污染程度来综合评价安徽省农业面源污染中N、P和COD对环境的污染情况,为今后便于环境管理以及保护人们的身体健康提供理论依据。

2. 资料与方法

2.1. 数据获取

本研究采用的化肥、畜禽养殖以及人口数据、耕地面积数据以及水资源(地表水和地下水)数据来源于2002~2011年《安徽省统计年鉴》。2000年5月,安徽省对某些地级市的管辖范围重新进行了划定,并正式划分出亳州作为独立的地级市。故将安徽省2001~2016年各地级市农业面源污染作为重点进行研究,提高数据的可靠性和可比性。

2.2. 数据分析

2.2.1. 污染物的计算

本次研究中针对农业面源污染中常见的总氮(TN)、总磷(TP)、化学需氧量(COD)进行分析研究, 化肥中的TN和TP根据年鉴中提供的数据直接得出, COD则参考《全国水环境容量核定技术指南》[13]计算; 畜禽粪便中污染物的计算, 参考国内相关研究[14][15]分别计算得出; 对于生活污染物中TN、TP、COD的计算则参考张大第等研究[16], 详见表1。

Table 1. Pollutant discharge coefficient of contaminant

表 1. 单位个体污染物年排污系数/kg·unit⁻¹

种类	TN	TP	COD
牛粪	31.91	8.614	226.3
牛尿	29.21	1.462	21.90
猪粪	2.352	1.364	20.80
猪尿	2.178	0.343	5.940
羊粪	7.118	2.467	4.394
禽粪	0.143	0.080	0.628
粪便 _人	0.584	0.146	5.840
污水 _{农村}	3.060	0.524	19.80
污水 _{城镇}	0.730	0.183	7.300

2.2.2. 污染物流失系数

根据已有的研究[17][18], 各类型污染物的流失量百分数如表2所示。其中生活污染物中耕地一栏“/”左侧代表农村粪尿的流失量, “/”右侧代表生活污水的流失量; 地表水一栏, 农村粪尿、污水的流失率为10%、85%, 城镇粪尿、污水的流失率为90%、15%, 地下水中的氮素为农村粪尿施入农田的20%; “-”代表本研究中不作考虑。

Table 2. Losing rate of pollutants

表 2. 各污染物流失率%

流失途径	污染物	耕地	地表水	地下水
化肥	N _{化肥}	100	11	30
	P _{化肥}	100	2	-
	COD _{化肥}	-	20	-
畜禽粪便	N _{畜禽}	90	30	20
	P _{畜禽}	90	30	-
	COD _{畜禽}	-	30	-
居民废弃物	N _{生活}	90/0		20
	P _{生活粪尿污水}	90/0	粪尿(10 _{农村} + 90 _{城镇}) 污水(85 _{农村} + 15 _{城镇})	-
	COD _{生活}	-		-

2.2.3. 水质健康风险评价模型

进行水质健康风险评价通常将污染物分为致癌和非致癌两类分别进行评价, 其评价模式包括: 危害识别、剂量-效应分析、暴露评价及风险表征。在本研究中没有实际检测地下水中氮污染物的浓度, 而是通过估算农

业面源污染中氮素进入地下水硝态氮浓度范围,宏观角度评价安徽省地下水的健康风险指数。美国环境保护署(US EPA)官方网站提供的健康风险评价属性数据表明,硝酸盐为非致癌物质,故采用US EPA提供的非致癌风险评价模型[19][20]进行饮用水的评价研究。

非致癌风险评价模型:一般认为,非致癌慢性危害以参考剂量为衡量标准,当日目标物质暴露剂量超过参考剂量时,有可能产生毒害效应,通常用风险指数(HI)表示,它指目标物质暴露剂量率与参考剂量的比值,数学表达式为:

$$HI = \frac{E}{RfD} \quad (1)$$

$$HI = \frac{C \times IR \times EF \times ED}{BW \times AT} \quad (2)$$

式中:HI为健康风险指数;E为暴露剂量,mg·(kg·d)⁻¹;RfD为地下水中目标物质的参考剂量,采用1.6 mg·(kg·d)⁻¹;C为硝态氮的浓度,mg·L⁻¹;IR为每日饮水量,建议成年人2 L·d⁻¹;EF为暴露频率,采用365 d·a⁻¹;ED为饮水持续时间,表示人体终生摄入该物质的年数,平均寿命70 a;BW为人的平均体重,平均体重采用70 kg;AT为暴露发生的平均时间,非致癌物为30 a×365 d·a⁻¹。

评价标准:本研究中非致癌风险以“1”为评价标准,风险指数大于1,表明人体所承受的非致癌风险度较高,在不可接受范围内;反之,人体所承受的总非致癌风险较低,可以接受。

3. 结果与讨论

3.1. 污染物总体情况

安徽省自2001~2016的16年间化肥的使用量增加了21.9%,达到327万吨,平均年增长率为1.9%;与此同时畜禽养殖产生污染物量从2001年的10,073.6万吨减少到2016年的6618.9万吨,16年间减少了34.3%;而生活污染物方面,由于直接与人口的数量相关,16年生活污染物排放量共增长11.9%。如图1所示,畜禽粪便量在2007年出现拐点,2001~2007年畜禽粪便量逐年降低,降低的趋势比较明显,2007~2016年粪便量逐渐平稳,但有小幅的增加趋势。工业固体废弃物的数据2001~2016年逐年增加,2007年工业固体废弃物的量与畜禽粪便量接近,2007年之前的一段时间工业固体废弃物量小于畜禽粪便量,而到2007年以后,工业固体废弃物的量开始超过畜禽粪便量,2011年后增长速度减缓。从这一现象可以看出,畜禽粪便、化肥用量和工业废物在2001~2016的16年间呈现3种不同的变化趋势,其中2007年之前的一段时间内,畜禽粪便程度已经达到甚至超过了工业固体废弃物的量,与其他学者的研究类似[21]。然而农业面源污染中,化肥和生活污染物的排放是不容被忽视的,所以对于农业面源污染应当更加重视。

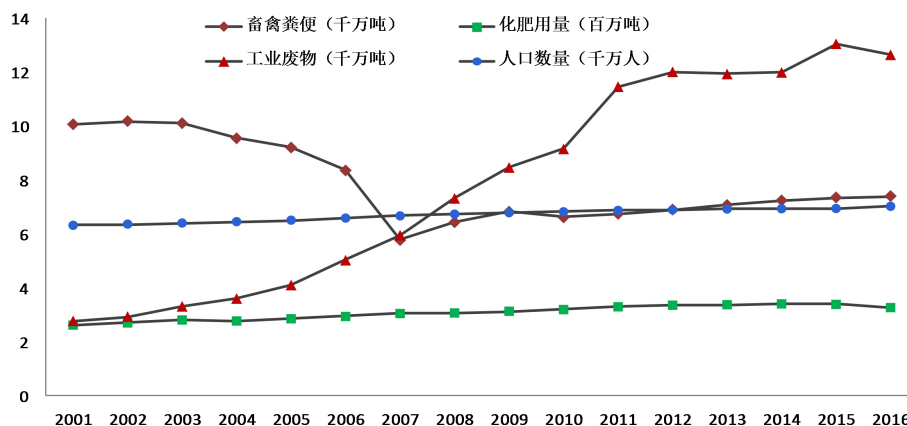


Figure 1. Quantity of pollutant discharged

图 1. 污染物排放量

经过计算得出, 2001~2016 年的 16 年间, 安徽省农业面源污染中氮素的总量变化范围在 211.5~231.4 万吨, 变化幅度为 9.41%, 平均每年变化幅度不到 1%; 磷素的变化范围是 86.47~101.28 万吨, 变化幅度为 17.13, 平均每年的变化幅度为 1.7%, 由此可见 2001~2016 年的 16 年间安徽省农业面源污染中氮、磷污染呈现比较稳定的趋势, 故考虑在污染物的计算中取 16 年的平均值来分析各地市的污染程度, 从而使数据的计算更加精确, 更准确的表达安徽省近 16 年的污染情况。

3.2. N 和 P 的耕地污染

3.2.1. 耕地 N 污染负荷情况

农业面源污染中, 化肥直接施用到耕地上作为作物的主要肥料, 在我国的大部分地区, 畜禽养殖业产生的大量粪便主要是作为有机肥料还田, 而生活污染中农村人口所产生的粪便也作为有机肥料还田(见表 1), 故对于耕地氮素负荷中, 总氮素包括化肥中的氮素、畜禽粪便施入耕地中的氮素以及农村人口产生的粪尿施入耕地中的氮素, 把农田耕地面积作为总氮素的实际负载面积。安徽省 2000 年 5 月对某些地级市的管辖范围重新进行了划定, 并正式划分出亳州市作为独立的地级市。经统计, 安徽省 2001~2016 年各地市施入耕地总氮量均值为 1.19~26.52 万 t, 折合当地耕地年 N 负荷量为 380.51~749.67 kg·hm⁻², 平均为 533.58 kg·hm⁻², 合肥、蚌埠、淮南、六安、芜湖、宣城、黄山 7 个地区超过了全省平均值。以产粮区为例, 在化肥习惯施用量为 225 kg·hm⁻² 纯氮的基础上, 猪粪当量以 15~30 [t·(hm²·a)⁻¹] 为宜, 最大施用量以 45 [t·(hm²·a)⁻¹] 为上限[22], 笔者认为在此基础上, 将猪粪当量转化为和化肥统一的纯氮量更为直观, 即化肥习惯施用量为 225 kg·hm⁻² 纯氮的基础上, 猪粪当量以每年 88.2~176.4 kg·hm⁻² 为宜, 最大施用量以 264.6 kg·hm⁻² 为上限。然而这种情况只适合单独考虑畜禽粪便污染物的情况下, 而当化肥使用量超过习惯使用量时, 若仍然按照习惯化肥使用量的情况, 单独检验畜禽粪便氮的污染风险是不全面的。在本研究中, 参考沈祥根等提出的畜禽粪便负荷警报值模型[22], 将其模型进行改进, 以化肥和畜禽粪便(将农村粪便等同看成畜禽粪便)总氮负荷量建立污染负荷风险模型:

$$R_N = \frac{(N_1/F_N + N_2/L_N)}{2} \quad (3)$$

式中: N_1 为化肥氮负荷, N_2 为畜禽粪便负荷, F_N 为化肥习惯施用量 225 kg·hm⁻², L_N 为畜禽粪便最大施用量 264.6 kg·hm⁻²。

如图 2 所示, 耕地氮素预警级别划分为: $R_N \leq 0.4$, 为 I 级, 无污染; $0.4 < R_N \leq 0.7$, 为 II 级, 稍有污染; $0.7 < R_N \leq 1.0$, 为 III 级, 有污染; $1.0 < R_N \leq 1.3$, 为 IV 级, 污染较严重; $R_N > 1.3$, 为 V 级, 污染严重。安徽省总氮素污染负荷量警报值平均为 1.09, 表明 2001~2016 年农业面源污染中氮素总负荷量总体处于 IV 级水平, 安徽省整体上处于污染较为严重程度, 其中合肥、蚌埠、淮南、黄山耕地氮素污染最为严重, 达到 V 级水平; 淮北、亳州、宿州、阜阳、马鞍山等 5 个城市预警级别相对较低, 但也都到达 III 级水平, 对环境存在污染; 而剩余的巢湖、芜湖、六安等 8 个城市污染水平居中, 均达到了 IV 级预警级别, 对农田耕地的污染处于较为严重水平, 可见安徽省农业面源污染中氮素对耕地的污染总体较为严重, 个别地区尤为突出。

3.2.2. 耕地 P 污染负荷情况

磷素在耕地中移动性很差, 已累计在土壤当中, 农田中过量的磷素很容易随着地表径流而进入地表水体, 引起水体富营养化。安徽省 2001~2016 年 16 年间各地施入耕地磷素的平均值为 0.66~11.88 万吨, 折合当地耕地年 P 负荷量为 137.94~307.31 kg·hm⁻², 平均 225.41 kg·hm⁻²。根据《中国化肥区划》[23], 长江中下游地区主要农作物水稻、玉米、小麦的磷肥适宜施用量分别为 45 kg·hm⁻²、38 kg·hm⁻²、45 kg·hm⁻², 2001~2016 年间复种指数为 1.56 [24], 计算安徽省年适宜施磷肥量为 70 kg·hm⁻², 土壤的粪便年施磷量不能超过 35 kg·hm⁻² [25], 当超过适宜使用量时容易对环境产生污染。

参照氮素风险模型建立总磷负荷风险模型:

$$R_p = \frac{(P_1/F_p + P_2/L_p)}{2} \quad (4)$$

式中: P_1 为化肥磷负荷, P_2 为畜禽粪便施磷负荷, F_p 为化肥适宜施磷量 $70 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, L_p 为畜禽粪便最大施用量 $35 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。

如图 3 所示, 耕地磷素预警级别划分为: $R_p \leq 0.7$, 为 I 级, 无污染; $0.7 < R_p \leq 1.2$, 为 II 级, 稍有污染; $1.2 < R_p \leq 1.7$, 为 III 级, 有污染; $1.7 < R_p \leq 2.2$, 为 IV 级, 污染较严重; $R_p > 2.2$, 为 V 级, 污染严重。其中合肥、蚌埠、淮南等 3 个城市的磷素水平达到最高的 V 级水平, 磷素负荷最为严重; 淮北、马鞍山和池州 3 个城市的磷素负荷相对较轻, 但也都达到 III 级水平, 对环境存在污染; 其余 11 个城市的磷素耕地符合处于 IV 级水平, 对环境污染较为严重。如不加以重视, 过量的磷素流失容易对周围水体产生污染。

3.3. TN、TP、COD 污染地表水

3.3.1. TN、TP、COD 地表水污染负荷情况

农业面源污染中对地表水造成污染的主要污染物以 TN、TP、COD 等为主, 由于安徽省所处的地理位置特殊, 水系比较发达, 近 16 年降雨量在 1100 mm 以上, 使得农业面源中的化肥、畜禽粪便和生活污染物很容易随地表径流流失到周边水体当中去。据计算 2001~2016 年安徽省平均每年向水体排放的化肥、畜禽粪便和生活污染物中 TN、TP、COD 的总量分别为 39.26 万吨, 7.77 万吨和 288.53 万吨。由于各地市地表水资源量差别较大(地表水量为 2001~2016 年的平均值), 从而使各地市污染物的扩散浓度相差很大。各地市 TN 的扩散浓度范围为 $0.75\sim 22.93 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 平均值为 $6.05 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$; TP 的扩散浓度为 $0.13\sim 4.87 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 平均值为 $1.19 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$; COD 的扩散浓度为 $5.19\sim 153.74 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 平均值为 $44.46 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。

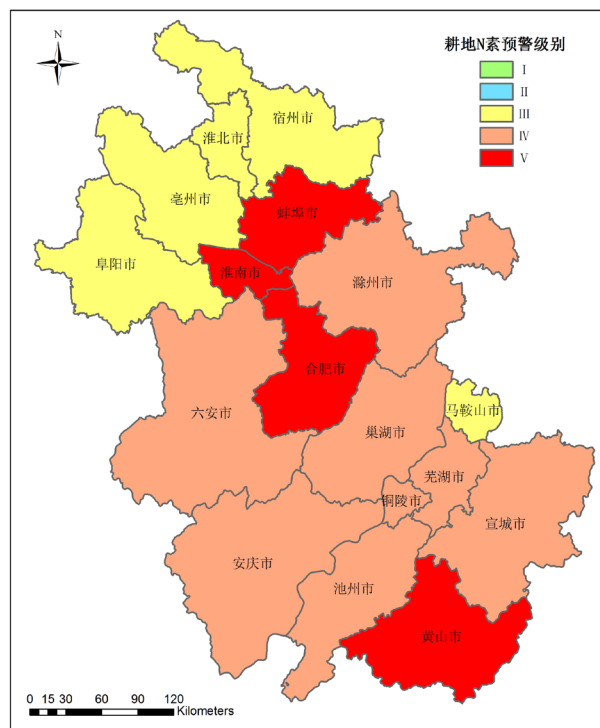


Figure 2. Cultivated land early warning levels of nitrogen
图 2. 耕地氮素预警级别

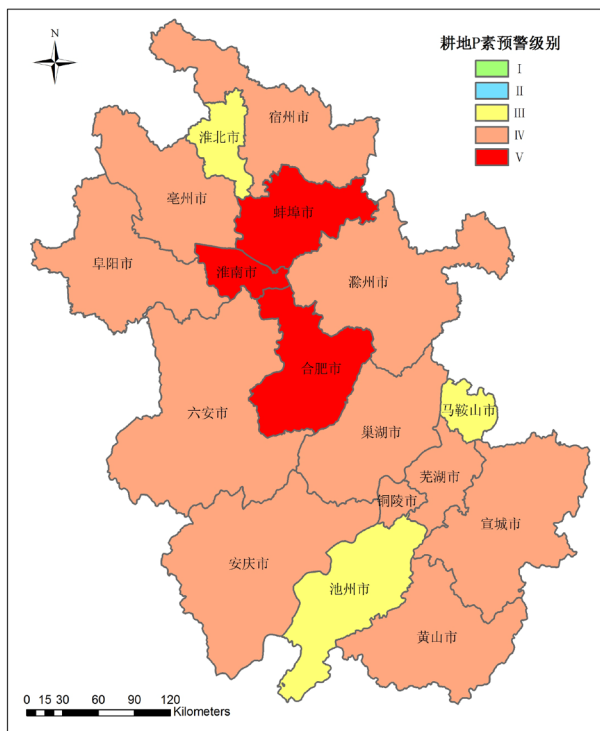


Figure 3. Cultivated land early warning levels of phosphate
 图 3. 耕地磷素预警级别

Table 3. The pollutant concentration level of surface water and ground water
 表 3. 地表水、地下水污染物浓度级别范围/mg·L⁻¹

	I	II	III	IV	V
TN	R < 5	5 < R < 10	10 < R < 15	15 < R < 20	R > 20
TP	R < 0.5	0.5 < R < 1	1 < R < 2	2 < R < 3.5	R > 3.5
COD	R < 40	40 < R < 70	70 < R < 100	100 < R < 140	R > 140
等标指数	R < 5	5 < R < 15	15 < R < 30	30 < R < 45	R > 45
硝态氮	R < 2	2 < R < 5	2 < R < 20	20 < R < 30	R > 30

如图 4~图 6 所示，从总体上看，安徽省 TN、TP、COD 地表水的扩散浓度空间差异较为明显，并且空间变化趋势大体相同，总体趋势安徽省北部地区污染物扩散浓度普遍较高，中东部次之，中西部和南部最低。TN 扩散浓度最高的是淮南和宿州 2 个城市，其次是淮北、亳州、阜阳和蚌埠 4 市，TP 的扩散浓度情况和 TN 基本一致，淮南、宿州、淮北、亳州 4 市最高，阜阳、蚌埠 2 市次之，说明这 6 个城市 TN、TP 对地表水的污染程度较高，对周边水环境造成的污染程度远高于其他地区，合肥市 TN、TP 的扩散浓度均处在 III 级水平，也具有潜在污染地表水的风险。其他地区虽然 TN、TP 的扩散浓度相对较低，但也不排除局部会对水体造成污染的可能性。对于 COD 的排放，从图 6 可以看出，相对于 TN、TP 的情况更为严重，除了安徽省北部扩散浓度较高以外，中东部的合肥、滁州、巢湖、马鞍山等城市 COD 扩散浓度也达到 III 级和 IV 级水平，对水环境存在影响，影响当地的水体质量。

3.3.2. 污染物等标污染负荷指数

参照本人之前的研究[15][26]，利用等标污染负荷指数的方法：

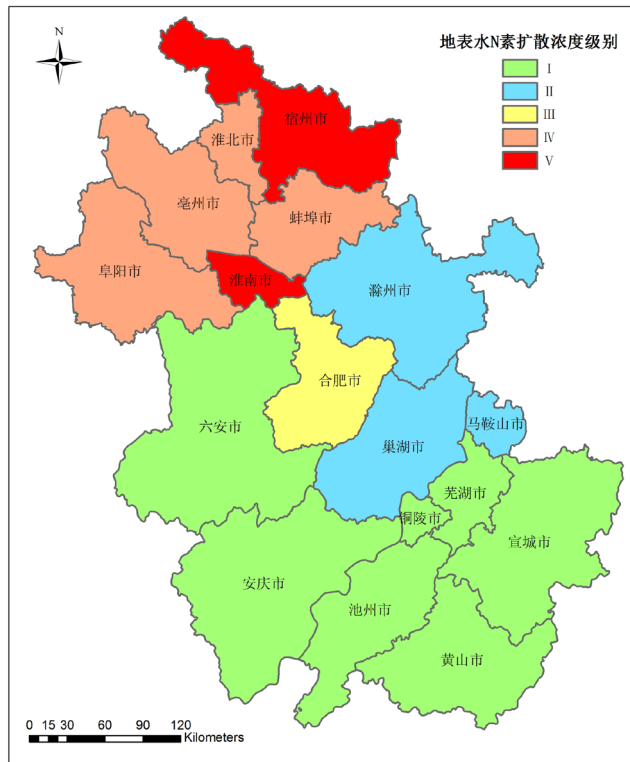


Figure 4. Diffusion concentration of nitrogen in surface water
图 4. 地表水氮素扩散浓度级别

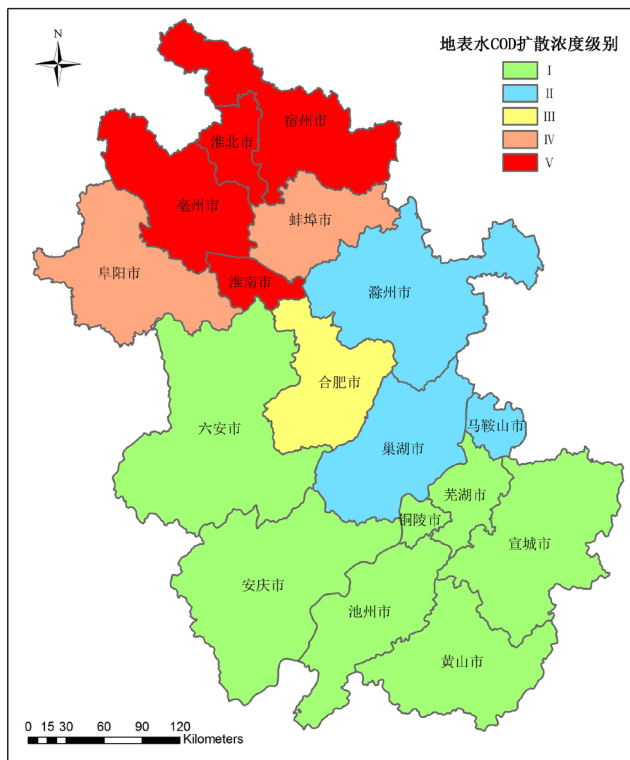


Figure 5. Diffusion concentration of COD in surface water
图 5. 地表水 COD 扩散浓度级别

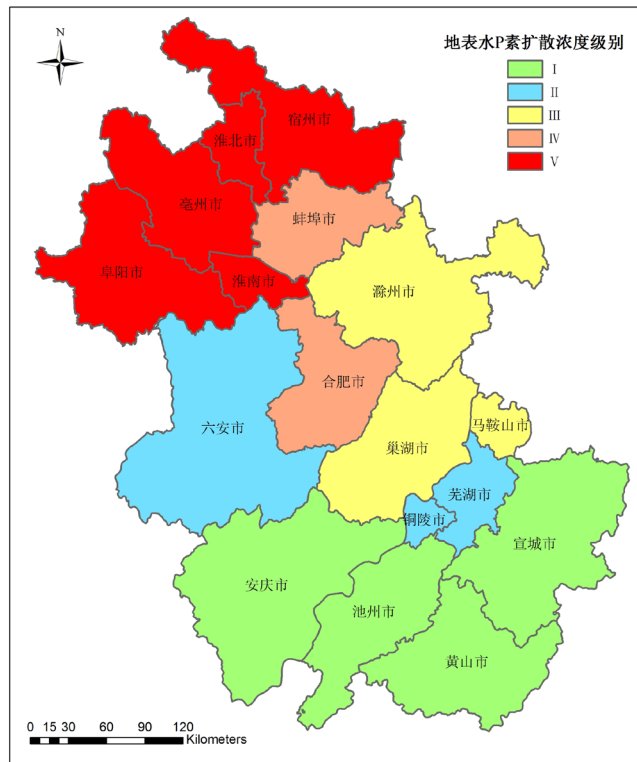


Figure 6. Diffusion concentration of phosphate in surface water
图 6. 地表水磷素扩散浓度级别

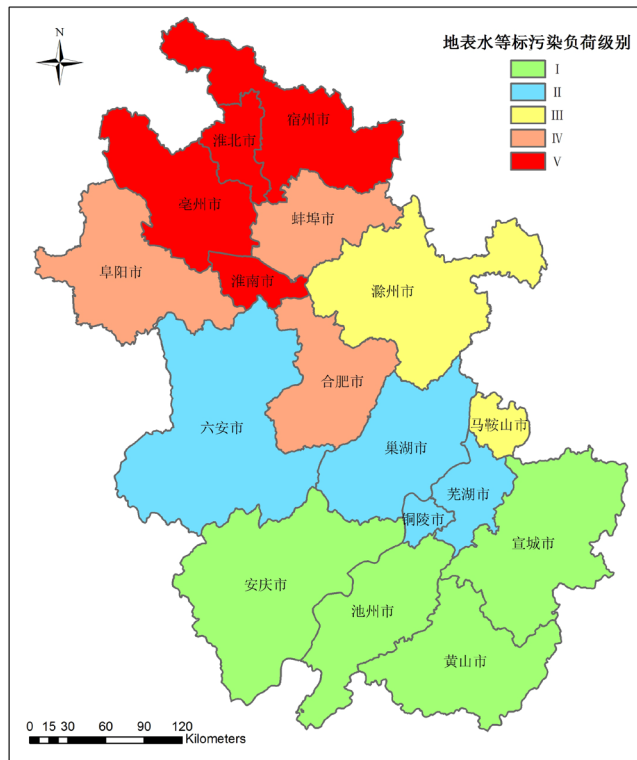


Figure 7. Diffusion concentration of ESPL in surface water
图 7. 地表水等标污染负荷指数

$$P_i = \frac{C_i}{C_o} \quad (5)$$

式中： P_i 为*i*污染物的等标排放量， m^3 ； C_i 为*i*污染物的流失量， $t \cdot a^{-1}$ ， C_o 为污染物按 GB3838-2002III 类标准系列的浓度(TN 为 $1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ；TP 为 $0.2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ；COD 为 $20 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$)取值。

等标污染指数法能综合反映 TN、TP、COD 对地表水的污染程度，并对等标污染指数进行分级。如图 7 所示，从整体来看安徽省地表水农业面源污染空间差异较大，呈现从南部至北部依次升高的趋势，安徽省中东部的马鞍山和滁州达到 III 级水平，对水体存在污染；合肥、阜阳、蚌埠等 3 个城市等标指数达到 IV 级水平，对地表水体污染较为严重；安徽北部的宿州、淮北、亳州、淮南等 4 个城市污染水平最高，对地表水质的影响严重。应当对等标污染指数达到 III 级及以上的城市控制化肥的使用量，调整畜禽养殖结构，同时控制生活污水的排放。其他等标污染指数相对较低的城市，依然不能放松警惕，仍然需要控制农业中化肥、有机肥的投入，从源头控制污染物的流失。

3.4. 氮素污染地下水

3.4.1. 地下水硝态氮污染情况

进入土壤中的氮，在降雨和灌溉水作用下，部分直接以化合物形式进入土壤下层，大部分以可溶性 NO_3^- 、 NO_2^- 和 NH_4^+ 形式淋洗到土壤下层。由于土壤颗粒对 NH_4^+ 的吸附能力强，对硝酸根离子的吸附能力很弱，造成农田土壤中氮素的淋溶形态以硝态氮为主，导致硝态氮在深层土壤中大量累积甚至进入浅层地下水，而铵态氮则主要集中分布在土壤表层。此外，对于作为硝化和反硝化过程中间产物的 NO_2^- ，由于其存在时间短，淋洗过程并不重要[27]。硝酸盐在地下水中的含量通常很低，当地下水中硝态氮(NO_3^- -N)含量超过 $3.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时，通常认为是由人类活动污染所致[28]。由于人们为了追求粮食的高产，不断地增加农田化肥和有机肥的用量，而作物的利用是有限的。美国学者 Kraft G J [17]在美国北部灌溉农区的试验表明，占氮素输入总量的 61%会通过淋失进入地下水，我国学者张玉良[29]在上世纪 80 年代就估算，施入农田的氮素约有 10%~40%进入地下水；陈淑峰等[30]也做过研究表示由于肥料施用不合理，约有 15%~55%氮素淋溶进入地下水，造成了地下水硝酸盐含量超过饮用水标准。

本研究中，将施入耕地的总氮素的 30%认为最终进入地下水，造成硝态氮的污染。据估算，2001~2016 年安徽省农业面源污染中平均每年进入地下水的氮素总量约为 63.88 万吨，各地市由此而产生的地下水硝态氮的浓度范围在 $7.60 \sim 95.44 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 范围之间，整个安徽省的平均值为 $35.60 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。在不考虑硝态氮在地下水中积累的情况下，已然超过了世界卫生组织规定饮用水中硝酸盐氮含量 $11.3 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ，美国规定的 $10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ，我国规定的 $20 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。参照段磊等人[31]的研究划定的地下水硝态氮浓度分级(见表 3)，农业面源污染中氮素下渗而产生的地下水硝态氮扩散浓度如图 8 所示，呈现从安徽省由南向北依次增高的趋势，只有安徽省南部的黄山、池州和宣城 3 个城市地下水硝态氮的浓度在 $5 \sim 20 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 范围内，属于我国规定的地下水硝态氮安全标准以内；安庆、铜陵和芜湖 3 个城市的浓度范围在 $20 \sim 30 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ；而剩余的安徽省其他 11 个城市，硝态氮的污染浓度均已超过 $30 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ，其中阜阳和淮南均超过了 $60 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ，而安徽省的省会合肥更是达到了 $95.44 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ，已经超过国家安全标准的 3 倍之多，其中超标的城市占城市总数的 82.4%。

3.4.2. 地下水硝态氮健康风险评估

经式(1)、(2)计算得出，安徽省地级市地下水硝态氮健康风险指数 HI 范围在 $0.318 \sim 3.996$ 之间，全省的平均值为 1.491，已经超过“1”，说明全省范围内依然对人体存在健康风险。本研究中将健康风险指数级别分为 5 个等级： $HI \leq 0.5$ 为 I 级水平，没有风险； $0.5 < HI \leq 1$ 为 II 级水平，存在潜在风险； $1 < HI \leq 2$ 为 III 级水平，风险较轻； $2 < HI \leq 3$ 为 IV 级水平，污染较严重； $HI > 3$ 为 V 级水平，污染严重。如图 9 所示，池州、黄山 2 市

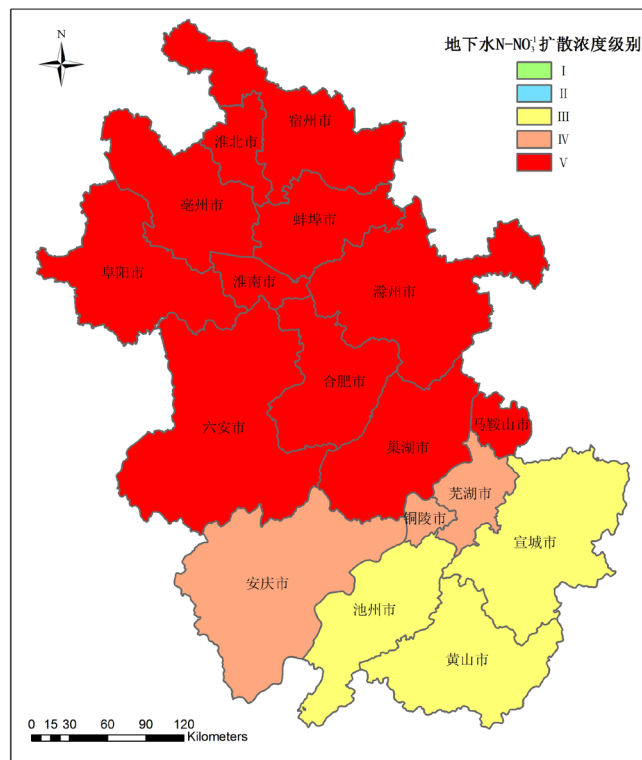


Figure 8. Diffusion concentration of nitrate nitrogen in ground water
图 8. 地下水硝态氮扩散浓度级别

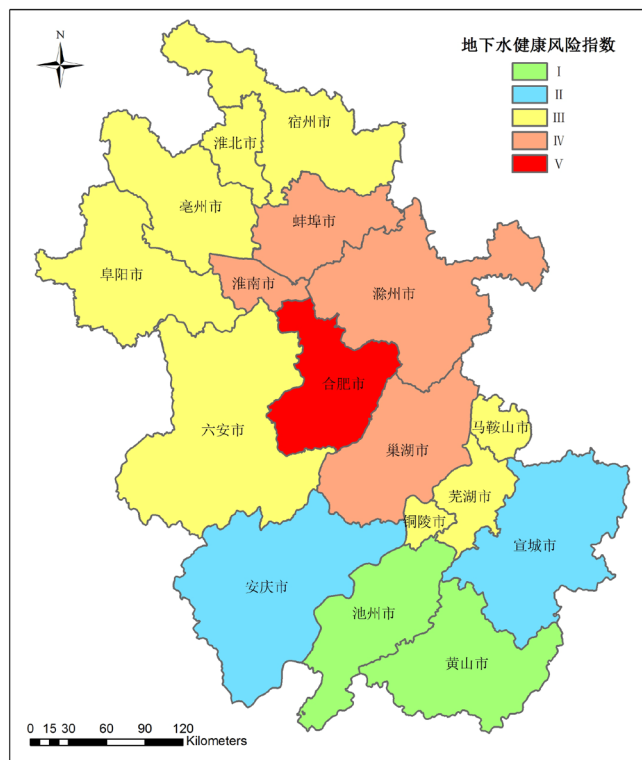


Figure 9. Health risk index of ground water
图 9. 地下水健康风险指数

的风险指数最低为 I 级, 没有风险; 安庆、宣城 2 市的风险指数为 II 级, 如不对污染物加以控制, 很容易达到污染级别; 淮北、亳州、宿州、阜阳、六安、马鞍山、芜湖、铜陵等 8 个城市, 污染指数达到 III 级, 对人体健康构成威胁; 蚌埠、淮南、滁州、巢湖 4 个城市风险指数达到 IV 级, 健康风险相对较严重; 合肥作为安徽省的省会城市, 健康风险指数最高, 达到 V 级, 如果不注意饮用水的安全, 很容易对人体健康产生风险。综合来看, 健康风险指数超过“1”的城市总共 13 座城市之多, 占城市总数的 76.5%, 表明安徽省农业面源污染中氮素污染地下水的程度依然很高, 应当引起环保和政府部门的注意。

4. 结论

1) 安徽省 2001~2016 年的 16 年间农业面源污染中氮、磷污染物的排放基本稳定在一个比较高的水平, 虽然畜禽粪便的量有降低的趋势, 但由于化肥和生活污染物的持续增加, 总体上农业面源污染物排放量在未来的一段时间内仍然将呈现小幅度不断增加的趋势。

2) 农业面源污染中主要的氮素和磷素对安徽省耕地的负荷程度总体偏高, 尤其是安徽省中部的合肥、淮南、蚌埠 3 个城市, 氮素、磷素耕地负荷均达到最高的 V 级预警水平, 其余城市的预警级别也均在 III 级以上, 很容易导致污染物的流失, 对周边地表水和地下水产生污染。该地区应该控制化肥和有机肥的使用量, 同时应加强对畜禽粪便的管理。

3) 农业面源污染物对安徽省地表水的污染, 在空间上呈现由南至北的污染程度依次升高的趋势。综合来看, 中东部以及北部城市污染严重, 其中合肥、阜阳、蚌埠等 3 个城市等标指数达到 IV 级水平, 宿州、淮北、亳州、淮南等 4 个城市污染水平最高, 很容易造成水体富营养化。

4) 农业面源污染中氮素会通过淋溶的作用进入地下水, 使地下水中的硝态氮浓度存在升高的风险, 根据估算, 只有南部的黄山、池州和宣城 3 个城市硝态氮浓度没有高于我国规定的 $20 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 标准, 超标的城市占总数的 82.4%。地下水健康风险指数超过“1”的城市总共 13 座城市之多, 占城市总数的 76.5%, 其中合肥风险指数最高, 已经达到 3.996, 应注意饮用水质量。

基金项目

长子营农业科技综合服务试验站建设与能力提升(2018022); 北京市农林科学院创新能力建设专项课题(KJCX20180507)。

参考文献

- [1] 黄红英, 常志州, 叶小梅, 等. 区域畜禽粪便产生量估算及其农田承载预警分析——以江苏为例[J]. 江苏农业学报, 2013, 29(4): 777-783.
HUANG Hongying, CHANG Zhizhou, YE Xiaomei, et al. Estimation of regional livestock manure production and farmland loading capacity: A case study of Jiangsu province. *Jiangsu Journal of Agricultural Sciences*, 2013, 29(4): 777-783. (in Chinese)
- [2] 陈敏鹏, 陈吉宁. 中国种养系统的氮流动及其环境影响[J]. 环境科学, 2007, 28(10): 2342-2349.
CHEN Minpeng, CHEN Jining. Nitrogen flow in farming-feeding system and its environmental impact in China. *Environmental Science*, 2007, 28(10): 2342-2349. (in Chinese)
- [3] 武兰芳, 欧阳竹. 种养结合生产区农田氮素平衡分析——以山东省禹城为例[J]. 农业环境科学学报, 2008, 27(4): 1312-1319.
WU Lanfang, OUYANG Zhu. Nitrogen budget of farmland in crop-animal mixed farming system area: A case study of Yucheng county in Shandong province. *Journal of Agro-Environment Science*, 2008, 27(4): 1312-1319. (in Chinese)
- [4] VIGHI, M., CHIAUDANI, G. Eutrophication in Europe, the role of agricultural activities. In: Hodgson, E., Ed., *Reviews of Environmental Toxicology*, Amsterdam: Elsevier, 1987: 213-257.
- [5] 王子臣, 邱丹, 堵燕钰, 等. 太湖流域典型菜地地表径流及氮磷流失特征[J]. 江苏农业学报, 2012, 28(6): 1501-1504.
WANG Zichen, QIU Dan, DU Yanyu, et al. Characteristics of surface runoff and nitrogen and phosphorus losses in typical

- vegetable field of Taihu lake basin. *Jiangsu Journal of Agricultural Sciences*, 2012, 28(6): 1501-1504. (in Chinese)
- [6] 李翠梅, 张绍广, 姚文平, 等. 太湖流域苏州片区农业面源污染负荷研究[J]. *水土保持研究*, 2016, 23(3): 354-359.
LI Cuimei, ZHANG Shaoguang, YAO Wenping, et al. Study on agricultural nonpoint source pollution load of Taihu lake basin in Suzhou. *Research of Soil and Water Conservation*, 2016, 23(3): 354-359. (in Chinese)
- [7] 许策, 李晔, 束继年, 等. 汉江流域荆门段面源污染负荷时空分布与污染现状评价[J]. *水土保持通报*, 2017, 37(4): 63-68.
XU Ce, LI Ye, SHU Jinian, et al. Spatial distribution and evaluation of non-point pollution source in Jingmen region of Hanjiang watershed. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2017, 37(4): 63-68. (in Chinese)
- [8] 梅林林, 朱大威. 江苏省苏南地区地下水环境质量评价及污染指标分析——以江苏省太仓市为例[J]. *江苏农业科学*, 2018, 46(5): 272-274.
MEI Linlin, ZHU Dawei. Groundwater environmental quality assessment and pollution index analysis in southern Jiangsu province: A case study of Taicang county, Jiangsu province. *Jiangsu Journal of Agricultural Sciences*, 2018, 46(5): 272-274. (in Chinese)
- [9] European Environment Agency. Europe's water quality generally improving but agriculture still the main challenge. Copenhagen: European Environment Agency, 2003: 235-241.
- [10] 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 Hongbin, LI Zhihong, ZHANG Yungui, et al. Nitrate contamination of groundwater and its affecting factors in rural areas of Beijing plain. *Acta Pedologica Sinica*, 2006, 43(3): 405-413. (in Chinese)
- [11] 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 Weili, WU Shuxia, JI Hongjie, et al. Estimation of agricultural non-point source pollution in China and the alleviating strategies I. Estimation of agricultural non-point source pollution in China in early 21 century. *Scientia Agricultura Sinica*, 2004, 37(7): 1008-1017. (in Chinese)
- [12] 刘钦普. 淮河流域化肥施用空间特征及环境风险分析[J]. *生态环境学报*, 2015, 24(9): 1512-1518.
LIU Qinpu. Distribution and environmental risk assessment of fertilizer application on farmland in Huai river basin. *Ecology and Environment*, 2015, 24(9): 1512-1518. (in Chinese)
- [13] 环境保护部环境规划院. 全国水环境容量核定技术指南[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2003: 36-38.
Chinese Academy for Environmental Planning. National water environment capacity verification technical guide. Beijing: China Environmental Science Press, 2003: 36-38. (in Chinese)
- [14] 阎波杰, 赵春江, 潘瑜春, 等. 大兴区农用地畜禽粪便氮负荷估算及污染风险评价[J]. *环境科学*, 2010, 31(2): 437-443.
YAN Bojie, ZHAO Chunjiang, PAN Yuchun, et al. Estimation of livestock manure nitrogen load and pollution risk evaluation of farmland in Daxing district. *Environmental Science*, 2010, 31(2): 437-443. (in Chinese)
- [15] 宋大平, 庄大方, 陈巍. 安徽省畜禽粪便污染耕地、水体现状及其风险评价[J]. *环境科学*, 2012, 33(1): 110-116.
SONG Daping, ZHUANG Dafang and CHEN Wei. Risk assessment of the farmland and water contamination with the livestock manure in Anhui province. *Environmental Science*, 2012, 33(1): 110-116. (in Chinese)
- [16] 张大第, 张晓红, 章家骥, 等. 上海市郊区非点源污染综合调查评价[J]. *上海农业学报*, 1997, 13(1): 31-36.
ZHANG Dadi, ZHANG Xiaohong, ZHANG Jiaqi, et al. Integrated research and evaluation on non-point source pollution in Shanghai suburbs. *Acta Agriculturae Shanghai*, 1997, 13(1): 31-36. (in Chinese)
- [17] KRAFT, G. J., STITES, W. Nitrate impacts on groundwater from irrigated-vegetable systems in humid north-central US sand plain. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2003, 100: 63-74. [https://doi.org/10.1016/S0167-8809\(03\)00172-5](https://doi.org/10.1016/S0167-8809(03)00172-5)
- [18] 宋大平, 左强, 刘本生, 等. 农业面源污染中氮排放时空变化及其健康风险评价研究——以淮河流域为例[J]. *农业环境科学学报*, 2018, 37(6): 1219-1231.
SONG Daping, ZUO Qiang, LIU Bensheng, et al. Estimation of spatio-temporal variability and health risks of nitrogen emissions from agricultural non-point source pollution: A case study of the Huaihe River Basin, China. *Journal of Agro-Environment Science*, 2018, 37(6): 1219-1231. (in Chinese)
- [19] KENTEL, E., ARAL, M. M. 2D monte carlo versus 2D fuzzy monte carlo health risk assessment. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 2005, 19(1): 86-96. <https://doi.org/10.1007/s00477-004-0209-1>
- [20] 陈炼钢, 陈敏建, 丰华丽. 基于健康风险的水源地水质安全评价[J]. *水利学报*, 2008, 39(2): 235-239, 244.
CHEN Liangang, CHEN Minjian and FENG Huali. Water source quality safety evaluation based on health risk assessment. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2008, 39(2): 235-239, 244. (in Chinese)
- [21] 朱建春, 张增强, 樊志民, 等. 中国畜禽粪便的能源潜力与氮磷耕地负荷及总量控制[J]. *农业环境科学学报*, 2014, 33(3): 435-445.
ZHU Jianchun, ZHANG Zengqiang, FAN Zhimin, et al. Biogas potential, cropland load and total amount control of animal manure in China. *Journal of Agro-Environment Science*, 2014, 33(3): 435-445. (in Chinese)

- [22] 沈根祥, 汪雅谷, 袁大伟. 上海市郊农田畜禽粪便负荷量及其警报与分级[J]. 上海农业学报, 1994, 10(增刊): 6-11.
SHEN Genxiang, WANG Yagu and YUAN Dawei. Livestock and poultry excrement load and its warning and classification in suburban Shanghai. *Acta Agriculturae Shanghai*, 1994, 10(supplementary issue): 6-11. (in Chinese)
- [23] 中国农业科学院土壤肥料研究所. 中国化肥区划[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 1986: 115-120.
Soil and Fertilizer Institute, Chinese Academy of Agricultural Sciences. Division of chemical fertilizer in China. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 1986: 115-120. (in Chinese)
- [24] 金姝兰, 刘春燕, 毛端谦. 长江中下游地区耕地复种指数变化特征与潜力分析[J]. 浙江农业学报, 2011, 23(2): 239-243.
JIN Shulan, LIU Chunyan and MAO Duanqian. Variation characteristics and developmental potentials on multiple cropping index of arable land in the middle and lower reaches of Yangtze River. *Acta Agriculturae Zhejiang*, 2011, 23(2): 239-243. (in Chinese)
- [25] OENEMA, O., VAN, L. E., PLETTE, S., et al. Environmental effects of manure policy options in the Netherlands. *Water Science and Technology*, 2004, 49(3): 101-108. <https://doi.org/10.2166/wst.2004.0172>
- [26] 宋大平, 陈巍, 高彦征. 淮河流域氮肥农药施用的合理性及其环境影响[J]. 农业环境科学学报, 2011, 30(6): 1144-1151.
SONG Daping, CHEN Wei and GAO Yanzheng. The usage rationality and environmental impacts of chemical nitrogen fertilizer and pesticide in the Huaihe river basin, China. *Journal of Agro-Environment Science*, 2011, 30(6): 1144-1151. (in Chinese)
- [27] 左海军, 张奇, 徐力刚. 农田氮素淋溶损失影响因素及防治对策研究[J]. 环境污染与防治, 2008, 30(12): 83-89.
ZUO Haijun, ZHANG Qi and XU Ligang. Study on the factors influencing nitrogen leaching loss from farmland and controlling measures. *Environmental Pollution & Control*, 2008, 30(12): 83-89. (in Chinese)
- [28] 陈建平, 丁际豫, 吴子杰. 氮肥对地下水中氮迁转机理研究[J]. 长江科学院院报, 2015, 32(2): 24-29.
CHEN Jianping, DING Jiyu and WU Zijie. Mechanism of migration and conversion of nitrogen fertilization in groundwater. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 2015, 32(2): 24-29. (in Chinese)
- [29] 张玉良. 农业化学与生物圈[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1987: 151-175.
ZHANG Yuliang. *Agricultural chemistry and biosphere*. Beijing: China Environmental Science Press, 1987: 151-175. (in Chinese)
- [30] 陈淑峰, 吴文良, 胡克林, 等. 华北平原高产粮区不同水氮管理下农田氮素的淋失特征[J]. 农业工程学报, 2011, 27(2): 65-73.
CHEN Shufeng, WU Wenliang, HU Kelin, et al. Characteristics of nitrate leaching in high yield farmland under different irrigation and fertilization managements in North China Plain. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2011, 27(2): 65-73. (in Chinese)
- [31] 段磊, 王文科, 孙亚乔, 等. 关中盆地浅层地下水水氮污染的健康风险评估[J]. 水文地质工程地质, 2011, 38(3): 92-97.
DUAN Lei, WANG Wenke, SUN Yaqiao, et al. Health risk assessment of "Three Nitrogen" in shallow groundwater in the Guanzhong Basin. *Hydrogeology and Engineering Geology*, 2011, 38(3): 92-97. (in Chinese)