

北京市农田生态系统氮素养分平衡与负荷研究 ——以密云县和房山区为例

姜甜甜^{1,2}, 高如泰², 夏训峰², 刘树庆¹, 许其功², 席北斗², 张 慧^{1,2}

(1.河北农业大学资源与环境科学学院, 河北 保定 071001; 2.中国环境科学研究院, 北京 100012)

摘 要:为揭示北京市农田生态系统氮素养分平衡与负荷状况,利用物质流分析中“输入=输出+盈余”的物质守恒原理,以氮素养分为介质建立农田生态系统氮素平衡模型。根据北京地区密云、房山 2007 年统计资料和文献查询获取的参数,估算了密云、房山氮养分输入、输出以及养分盈余,并分析了养分产生的环境效应。结果表明,2007 年损失进入大气和水体环境中的养分总量分别为 4 255.26 t 和 7 728.95 t,盈余在农田生态系统土壤中的养分总量分别为 7 320.51 t 和 14 566.64 t,通过损失途径进入环境和盈余在农田生态系统中的单位面积耕地氮养分负荷高风险地区集中在密云、房山的东部地区。通过对比研究,分析氮养分损失态和盈余态负荷基本趋势,找到了污染潜势产生原因,提出了促进农田氮平衡与降低氮养分负荷相应的调控对策和措施。

关键词:平衡模型;氮;化肥;养分负荷;污染潜势

中图分类号:S181 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-2043(2009)11-2428-08

Nitrogen Nutrient Balance and Load in Agro-ecosystem of Miyun Fangshan County in Beijing

JIANG Tian-tian^{1,2}, GAO Ru-tai², XIA Xun-feng², LIU Shu-qing¹, XU Qi-gong², XI Bei-dou², ZHANG Hui^{1,2}

(1.College of Resources and Environmental Sciences, Hebei Agriculture University, Baoding 071001, China; 2.Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China)

Abstract: N nutrient is important indicators of soil fertility, then excessive N fertilization in intensive agricultural areas of China has resulted in serious environmental problems because of atmospheric, soil, and water enrichment with reactive N of agricultural origin. N nutrient balance and load in Agro-ecosystem of Miyun Fangshan County in Beijing were studied in this paper. Based on the theory of conservation of substance “input = output + surplus” in substance flow analysis(SFA) method, N nutrient balance model of agro-ecosystem was built. Data obtained from Miyun and Fangshan statistical report in 2007 and parameters acquired from recent references. Input, output and surplus of N nutrient in agro-ecosystem were estimated for appraising environmental effect. The result indicated: N loss enters in atmospheric and the water environment were 4 255.26 t and 7 728.95 t in 2007, N surplus were 7 320.51 t and 14 566.64 t in agro-ecosystem, and high environmental risk arose by these two county of N nutrient existing in east regions. Meanwhile, comparing the research between two area, the dynamic changing tendency of N loss and surplus was analyzed. The reason of the potential tendency of pollution was excessive N fertilization practices, and the regulating ways relevant was given. A better N balance can be achieved without sacrificing crop yields but significantly reducing environmental risk by adopting optimum N fertilization techniques, controlling the primary N loss pathways, and improving the performance of the agricultural Extension Service.

Keywords: balance model; nitrogen; fertilizer; nutrient load; the potential tendency of pollution

近年来,有关区域农田养分变化、养分平衡、施肥现状及评价的研究已成为国内外养分资源综合管理

的热点问题^[1-6]。其中,农田生态系统氮养分平衡状态是决定作物产量、土壤肥力及农业环境影响的主要因素和重要指标,特别是农业污染作为非点源污染,区域空间差异性较强,监测困难。因此,核算农田系统的养分平衡状况,辨别系统内的盈亏状态,是分析农业生产和农业环境的重要手段^[7-8]。由于受自然地理、生态环境和社会经济发展等因素的制约,不同区域尺度下

收稿日期:2009-05-20

基金项目:国家水体污染控制与治理科技重大专项(2008ZX07209-007, 2009ZX07632-02 和 2009ZX07106-001)

作者简介:姜甜甜(1983—),女,河北石家庄人,在读硕士,主要从事土壤环境质量方面的研究。E-mail:jiangtiantian1983@163.com

通讯作者:高如泰 E-mail:grthu@126.com

的农田氮养分平衡研究结果具有较大的差异^[9]。而县域作为基本行政单元,也是农业政策实施的最小基本单元,研究方案的实施容易统一和协调^[10]。

因此,本研究选择北京市密云县和房山区为研究对象(分别代表山区县和半山区县),根据统计资料数据,分析氮的收支变化和平衡盈余情况,计算两区县农田生态系统产生环境污染潜势的单位面积耕地氮养分的负荷量,并且分析污染潜势产生的原因和减排措施,力求从宏观上说明农田氮养分状况,为北京地区农田生态系统有效地调控农田氮养分、培肥地力和控制化肥施用对环境的污染提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区的概况

密云县位于北京市东北部,总面积 2 226 km²,东经 116°41′~117°30′,北纬 40°14′~40°48′之间,属暖温带季风型半湿润气候,年平均气温在 10.8 ℃,无霜期 173 d 左右,年均降水量 650 mm。密云县为北京地区典型的山区区县。

房山区位于北京西南部,处华北平原与太行山交界地带,西部和北部是山地、丘陵,东部和南部为沃野平原,总面积 2 019 km²,为北京地区典型的半山区区县。地理坐标为北纬 39°30′~39°55′,东经 115°25′~116°15′。该区属温带大陆性气候,年平均气温 11.6 ℃,无霜期为 185 d,年平均降水量 687 mm。

1.2 研究方法

1.2.1 建模方法

在农业生态体系里,国外建立的养分平衡模型主要包括三种:第一种是“农场门”模型或者叫黑箱模型;第二种是“土表”养分平衡模型,主要是用来计算土壤根层深度的养分平衡;第三种是“土壤系统”养分平衡模型,多用来确定盈余养分的去向^[11]。本文结合上述三种模型各自的优点,建立农田生态系统氮素平衡模型(图 1),然后按照物质流分析的原理,即物质守恒定律:养分的输入=输出+盈余,进行输入输出和盈余养分流线的计算。

模型的输入项主要包括化肥、有机肥、生物固氮、作物种子带入、灌溉、干湿沉降;输出项主要包括作物收获、氨挥发、硝化反硝化、氮淋失、土壤侵蚀损失;盈余量=输入量-输出量。

1.2.2 基础数据和参数选择

该模型共涉及计算公式 11 项,其中输入项 6 项,输出项 5 项。研究数据来源为 2 007 年的密云、房山

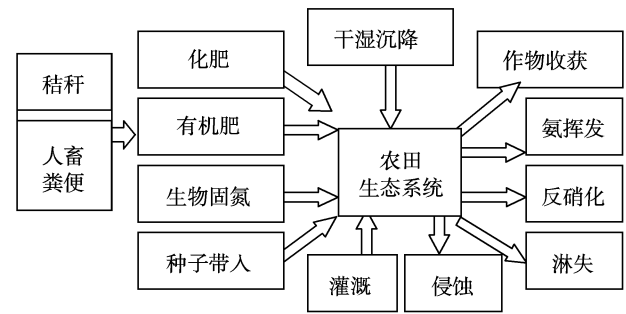


图 1 农田生态系统氮素平衡分析模型示意图

Figure 1 Sketch map of N nutrient balance model of agro-ecosystem

统计年鉴。研究涉及参数众多,其中复合肥氮磷钾的养分比为 0.325:0.514:0.16^[12];各种畜禽粪便产生量及氮含量、谷草比、秸秆与种子及籽粒氮系数、还田率参考文献[13–17]和全国农业技术推广中心编写的《中国有机肥料养分志》取值;共生固氮速率参照文献定为^[17]大豆 75 kg·hm⁻²、花生 80 kg·hm⁻²,非共生固氮速率 15 kg·hm⁻²;干湿沉降系数引用最新研究成果^[18]取 30.6 kg·hm⁻²;灌溉水氮含量 15 kg·hm⁻²^[19];氨挥发、硝化反硝化及氮淋失的参数分别取文献[19]研究的平均值 22.05%、1.7%及 7.4%;根据文献[16]选定粪尿及秸秆氮挥发系数为 15%和 1%,土壤侵蚀流失氮系数为 6 kg·hm⁻²。

1.2.3 计算与分析原理

(1) 氮养分平衡指数

氮养分投入量与农作物氮吸收的养分量之比称为氮养分平衡指数,以 K 表示。 $K=1$,氮养分平衡; $K>1$,氮养分有盈余,氮养分投入量多于农作物吸收量; $K<1$,氮养分亏缺,氮养分投入量少于农作物吸收量。

(2) 氮养分平衡率

氮养分收入和支出的差值占氮养分支出的百分含量为氮养分平衡率,以 V 表示。 $V<0$,氮养分亏缺; $V=0$,氮养分平衡; $V>0$,氮养分盈余。

(3) 氮养分负荷

氮养分损失总量和耕地面积的比值即单位面积耕地损失态氮养分负荷;氮养分盈余总量和耕地面积的比值即单位面积耕地盈余态氮养分负荷。

1.2.4 分析方法

统计数据和计算参数采用 Excel 统计软件进行列表和统计,并用 SPSS 统计软件进行相关性检验,然后按某一特征将密云、房山数字化地图的图形库和计算得到的单位面积耕地氮养分负荷量挂接,再采用 ArcGIS 生成氮数字养分负荷分布图,用来分析养分负荷引起的环境效应的空间分布规律。

2 结果与分析

2.1 氮素养分投入状况

氮素养分供应总量见图 2。两县的化肥氮所占氮养分投入的比例均在 75%以上,房山的化肥氮更达到了 82.83%,可见化肥氮仍然是氮养分投入的最主要来源,有机肥氮素的投入在两区县中均位于第二位。研究表明,有机肥与无机肥氮素养分投入维持在 1:1 较为理想^[20],而密云、房山的化肥氮投入分别是有机肥氮投入的 5 倍和 8 倍以上,可见两县有机肥投入比例偏低,有机肥对氮投入的贡献较小。其主要原因在于目前畜禽生产的日益集约化大大降低了畜禽粪便还田率,且秸秆平均还田率较低,不到 40%^[21]。

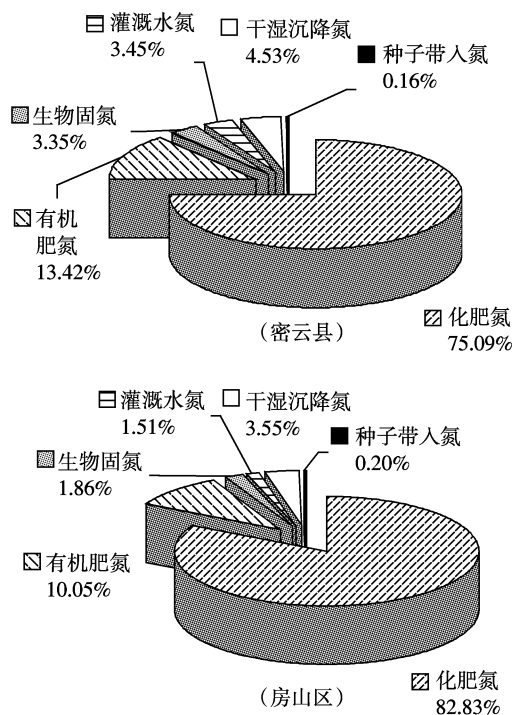


图 2 密云、房山各来源输入氮所占比例

Figure 2 The proportion of each input nitrogen accounts for Miyun, Fangshan

同一地区内,化肥的施用不平衡主要表现在超量施肥和施肥不足的现象同时存在,这种分布在氮肥投入上最明显。目前产量水平下,在推荐施肥中,将氮肥投入量分成 3 级:150~250 kg·hm⁻² 为适中,小于 150 kg·hm⁻² 为不足,大于 250 kg·hm⁻² 为超量^[22]。

从图 3 可以看出密云各乡镇的化肥氮(氮肥与复合肥中氮折纯合计)单位面积施用量情况,不老屯等 9 个乡镇施用量超过 250 kg·hm⁻²,其中大城子镇超量最大,达到 745.54 kg·hm⁻²。这主要是因为这些乡镇大

量种植粮食作物,果园面积较大,且设施农业较发达。密云镇、穆家峪镇、石城镇的氮肥投入量均不足 100 kg·hm⁻²,其中又以密云镇投入最低,为 52.19 kg·hm⁻²,仅为最低标准的 1/3,主要是因为密云镇农村的主导产业是蔬菜种植、奶牛养殖,同时较注意环境监管。溪翁庄镇、十里堡镇、河南寨镇、冯家峪镇的氮肥投入较为适中。综合全县情况,化肥氮投入平均值为 326.36 kg·hm⁻²,达到了超量标准水平。

由图 4 可见房山各乡镇的化肥氮(氮肥与复合肥中氮折纯合计)单位面积施用量状况,超过半数乡镇化肥施用量均超过 250 kg·hm⁻²,表现为氮肥投入超量,其中,琉璃河、阎村、窦店、长阳等乡镇更是超过了 1 000 kg·hm⁻²,特别是长阳镇,高达 1 717.28 kg·hm⁻²,超过标准 6 倍之多。这主要是因为这些乡镇位于平原区,大量种植粮食和经济作物,蔬菜和果园面积较大,农业生产发达,温室大棚等设施农业分布较广。霞云岭等 5 个乡镇的氮肥投入量均低于 150 kg·hm⁻² 标准,表现为氮肥施用不足,以佛子庄投入最低,为 17.60 kg·hm⁻²,仅为最低标准的 1/9,主要是因为这些乡镇大都位于山区,矿产和旅游资源丰富,更侧重旅游和矿业的发展。城关、青龙湖等乡镇的氮肥投入较为适中。综合全县情况,化肥氮投入的平均值为 821.32 kg·hm⁻²,远远超过了超量施肥量界限,全县化肥氮投入极不平衡,超量和不足同时共存。

2.2 氮素养分输出状况

在氮养分的输出项里,作物收获一直是极为重要的部分。研究结果表明,随着投肥水平不断提高,能较大幅度地提高农田生产力水平,但由于高的化肥养分投入量导致肥效报酬递减以及投肥结构的不合理,影响了各种养分的有效发挥,致使作物产量不能持续提高(表 1)。就总施肥量而言,密云每投入 1 kg 肥料氮作物产量增加 13.56 kg,然而房山每投入 1 kg 肥料氮作物产量增加 7.42 kg。因此,为促进作物产量的稳步增长,必须改善肥料结构,保持养分供求均衡,获得综合的经济效益和生态效益。

除作物收获外,密云、房山氮养分其他输出项也占很大比例。肥料氮投入大大超过了最适宜施肥量(见图 3、图 4),导致来自于土壤表面的氨挥发量不断增加,氮素反硝化损失数量越来越大。研究表明^[23],1990 年以后我国农田肥料氮的气态损失(氨挥发和硝化-反硝化)超过 400 万 t,20 世纪末达 650 万 t,远超过从粪肥中获得的氮总量(350~450 万 t),这是农业管理中最为严重的经济损失,也是环境污染的重要组成部分。

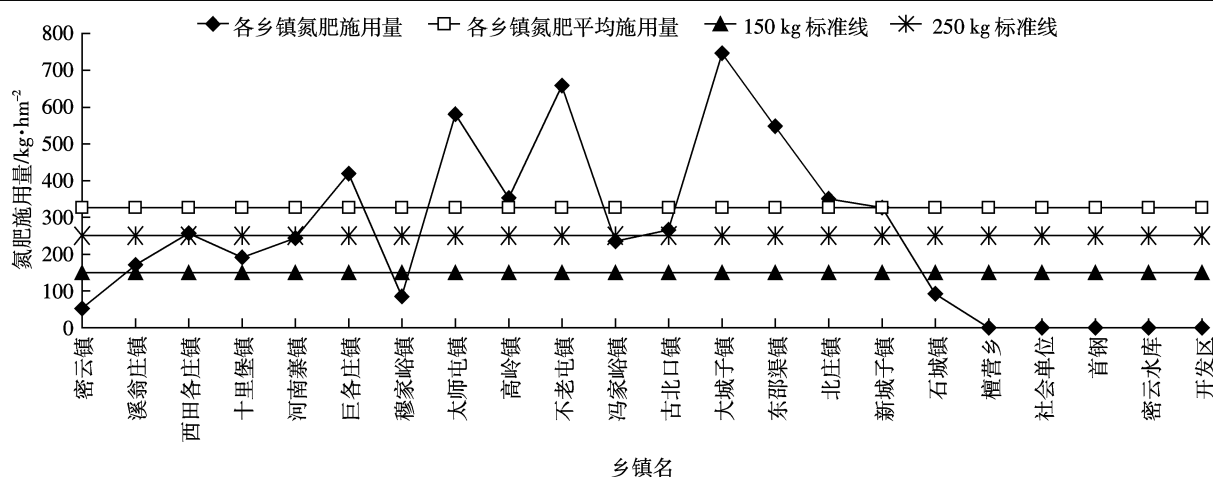


图 3 密云各乡镇单位面积氮肥施用量

Figure 3 Nitrogenous fertilizer application rate per hectare in each town of Miyun

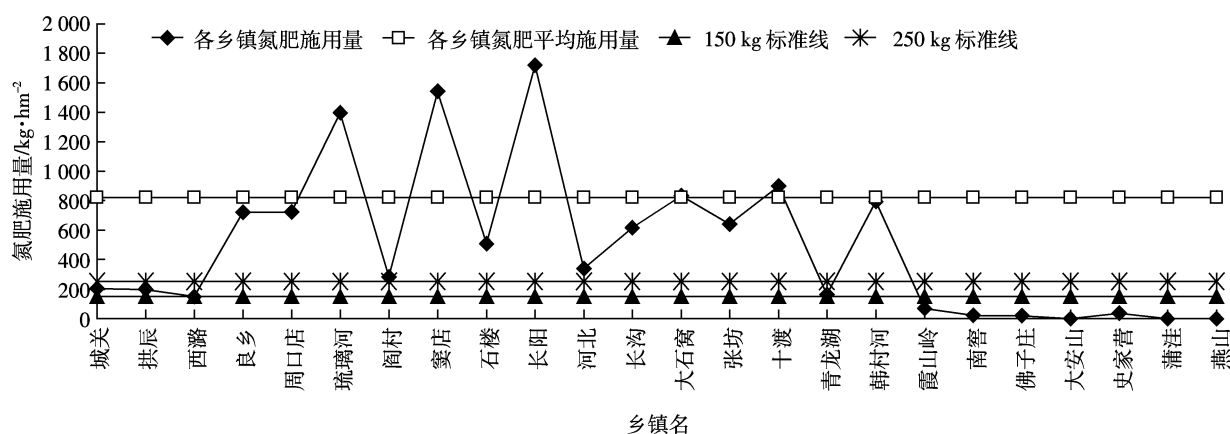


图 4 房山各乡镇单位面积氮肥施用量

Figure 4 Nitrogenous fertilizer application rate per hectare in each town of Fangshan

表 1 密云房山产投比对比

Table 1 The ratio of produces and throws for Miyun, Fangshan

地区	肥料氮施用量/kg·hm ⁻²	粮食作物产量/kg·hm ⁻²	产投比
密云	434.63	5 891.85	13.56
房山	991.60	7 360.95	7.42

本研究的计算结果验证了该结论,两县氮挥发和反硝化总量(密云:3 145 t,房山:5 849 t),远远大于从粪肥中获得的氮总量(密云:1 913 t,房山:2 359 t)。

2.3 氮素养分平衡分析

在农业生产中,由于人为施用的养分与农田损失的养分不协调,造成了农田氮养分比例的失调。同时,肥料结构不合理,一方面导致氮养分肥料利用率降低,另一方面也加速了农田氮养分的失衡,使得农田养分的失衡状态难以彻底改观。因此,本研究对两个区县氮素养分平衡进行了分析。

从分析结果看(表 2),2007 年密云、房山县农田氮素输入远大于支出,氮养分平衡指数分别为 3.61 和 4.97,指数值远大于 1,表明出现了大量氮素盈余。农田生态系统土壤中氮素总盈余分别为 7 320.51 t 和 14 566.65 t,占总输入氮量的 45.72%和 52.19%。

一般来说,农田氮素平衡盈余超过 20%时,即可能引起氮素对环境的潜在威胁^[22]。盈余较低的密云,氮养分平衡盈余率也在 80%以上,而房山的氮养分平衡盈余率竟达到 109.12%,可见密云、房山两区县氮素投入过高的问题十分突出,对环境造成的潜在威胁值得重视。这种情况不仅导致环境污染,而且还会浪费大量能源,因为生产氮肥比生产磷肥在等量养分基础上能源消耗多 4 倍,比生产钾肥多 8 倍^[8],这同时也会导致更多问题,如化肥(主要是氮肥)增产效率的下降等。

表 2 密云、房山氮素养分平衡

Table 2 Nitrogen nutrient balance for Miyun, Fangshan

方式	项目	密云	房山
氮营养输入/t	化肥	12 022.31	23 119.67
	有机肥	2 148.41	2 804.26
	干湿沉降	725.92	991.30
	生物固氮	535.66	518.93
	灌溉水	552.56	422.24
	种子带入	25.47	56.62
	输入合计	16 010.33	27 913.02
氮养分输出/t	作物收获	4 434.56	5 617.43
	氨挥发	2 940.21	5 456.16
	硝化-反硝化	204.38	393.03
	氮淋失	889.65	1 710.86
	土壤侵蚀	221.02	168.89
	输出合计	8 689.82	13 346.37
氮养分盈余/t	氮养分盈余	7 320.51	14 566.65
氮养分平衡	氮养分平衡指数	3.61	4.97
	氮养分平衡率	84.24%	109.12%

2.4 氮素养分负荷分析

2.4.1 损失态和盈余态氮的耕地负荷

农田生态系统对环境造成污染氮的来源主要包括两部分:一部分是通过挥发、反硝化、淋失和土壤侵蚀等养分损失途径直接进入水体和大气环境中的氮,另一部分是盈余在农田生态系统土壤中的氮。为了比

较密云、房山这两部分来源的氮对环境造成的污染风险,在上述计算的基础上,采用氮养分总量和耕地面积的比值即单位面积耕地氮养分负荷这个指标进行对比研究。

根据密云、房山各个乡镇农田生态系统氮养分损失总量和耕地面积,经计算得到单位面积耕地损失态氮养分负荷空间分布(图 5)。从图中看出,密云县单位面积耕地损失态氮养分负荷总体表现为东部地区高于西部地区,而房山区总体表现为东部高于西部,南部高于北部,其中东部的氮损失最为严重。2007 年密云县氮养分损失负荷的平均值是 $115.52\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,超过平均值的有 7 个乡镇,大城子镇的污染潜势最高,氮养分损失负荷达到了 $248.23\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。2007 年房山区氮养分损失负荷的平均值是 $274.57\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,超过全县平均值的乡镇有 4 个,整体表现为平原区高于山区,污染潜势最高的是长阳镇,氮养分损失负荷为 $551.15\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。因此,它们均对环境产生了极大的威胁性。对两区县进行对比可见,房山区氮养分损失负荷的平均值都超过了密云县 1 倍以上,最大值是密云近 3 倍,对环境的影响更大。

根据密云、房山两区县各个乡镇农田生态系统土壤中盈余的氮素养分总量和耕地面积,计算得到单位面积耕地盈余态氮素养分负荷空间分布示意图(图 6)。从图中看出,密云县单位面积耕地盈余态氮素养分负

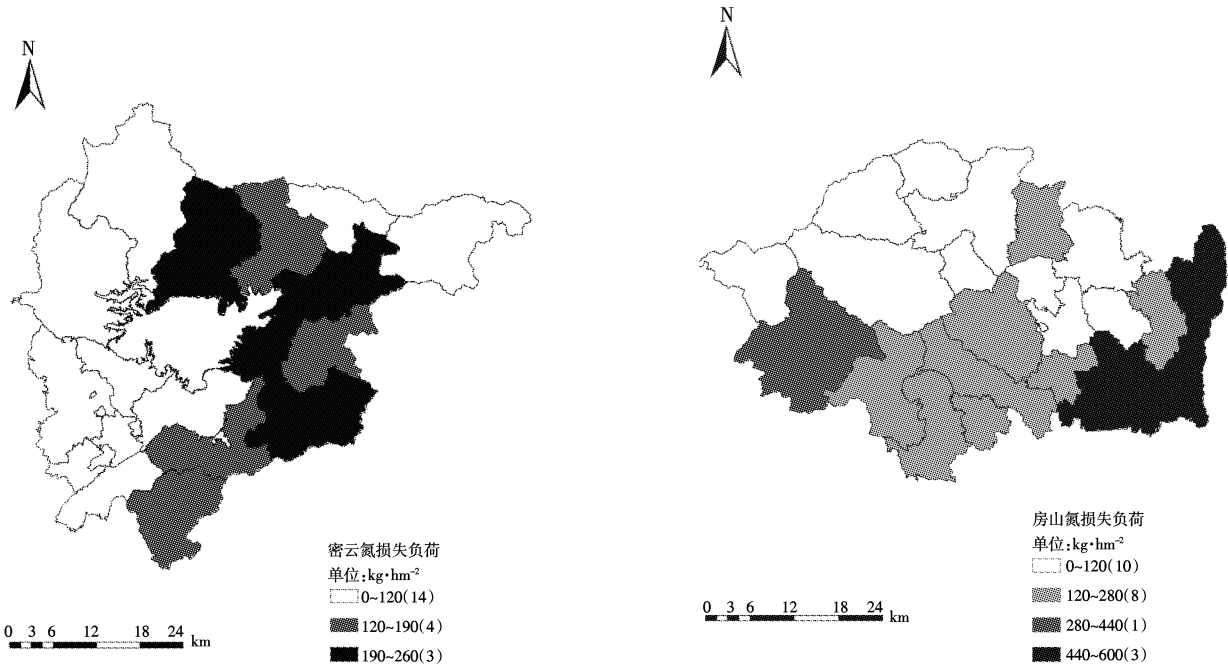


图 5 密云、房山损失氮素养分负荷示意图

Figure 5 Load of N loss per hectare cropland in Miyuan and Fangshan

荷总体表现为东部地区高于西部地区,房山区的空间分布规律是南部地区高于北部地区。2007 年密云县盈余态氮素养分负荷平均值是 $198.73 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 整体表现为平原区高于山区, 污染潜势最高的为大城子镇, 盈余态氮素养分负荷达到 $515.52 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。2007 年房山盈余态氮素养分负荷平均值是 $517.47 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 污染潜势最高的为长阳镇, 盈余态氮素养分负荷 $1147.43 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。对比密云和房山两区县, 房山区盈余态氮素养分负荷在各乡镇差别较大, 分布极不平衡。密云县盈余态氮素养分负荷总体小于房山区, 其最大值与房山区的均值相当。因此, 房山的氮盈余状况对环境产生了更大的威胁性。

分析结果表明, 两区县损失态氮与盈余态氮的

量均远高于全国平均水平 ($87.1 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 和 $97.3 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)^[23]。虽然目前还没有全国及不同地区单位面积耕地养分负荷的限量标准, 但是这些高污染风险地区如果不及时采取措施, 必然会从高污染潜势地区发展成为污染地区。

2.4.2 污染潜势产生的原因

由前述计算分析可知, 氮养分最主要输入项是化肥, 不同地区单位面积耕地总盈余氮养分(盈余态氮养分和损失态氮养分总和)负荷应该和单位面积耕地的化学氮肥投入量密切相关。因此, 本研究对单位面积耕地氮养分总盈余量和化学氮肥投入量的相关关系进行了分析(图 7)。从图中可以看出, 密云、房山单

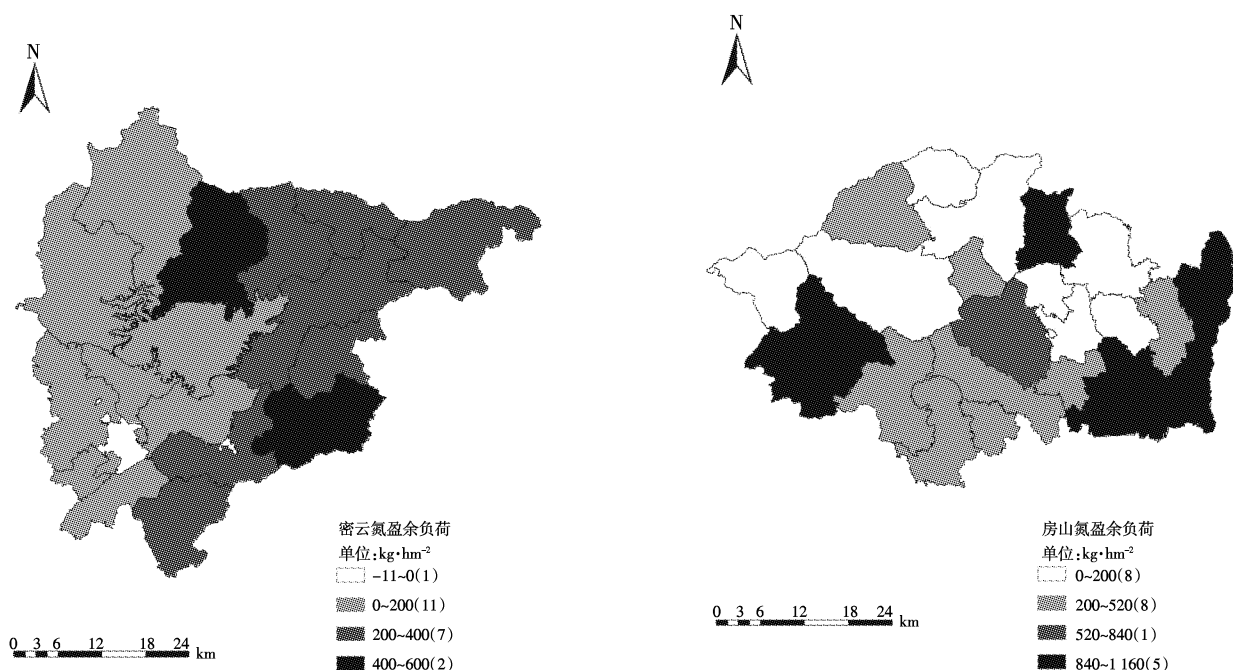


图 6 密云、房山盈余态氮素养分负荷示意图

Figure 6 Load of N surplus per hectare cropland in Miyuan and Fangshan

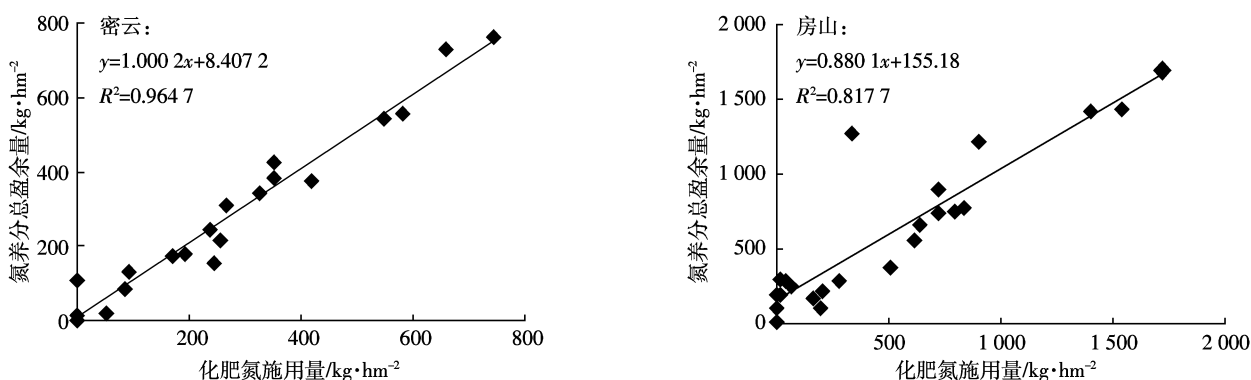


图 7 单位面积耕地氮养分盈余量和化肥氮施用量的相关关系

Figure 7 Relationship between N load per hectare cropland and fertilizer application rate

位面积耕地化肥氮投入量和氮养分盈余量呈线性相关,相关系数 r 分别达到0.982和0.904,统计检验表明达到相关极显著水平。

分析结果表明,污染潜势产生的原因主要是化肥氮。密云县的污染潜势低于房山区,主要是由于密云水库作为北京市的重要饮用水源地,密云的旅游资源又极为丰富,无论是有关政府部门还是相关科研工作都对密云的环境状况给予极大重视;而房山区作为半山区半平原区,农业生产作为传统产业受到重视,为增产而投入的化肥氮数量巨大,约为密云投入的两倍,在造成大量盈余的同时也造成了极大的污染潜势。因此,合理施用化学氮肥是不同地区农田生态系统减少氮素养分对环境造成污染潜势的主要措施。

此外,有机氮素养分资源利用率不高,大量的氮素养分资源易于挥发和流失造成了环境污染^[23],因此减少有机养分的损失也是降低氮养分污染潜势的重要途径。

3 结论与对策

(1)根据物质守恒原理,构建了农田生态系统氮素平衡模型。对2007年密云、房山农田生态系统氮养分平衡的估算结果表明损失态氮养分总量分别为4 255.26 t和7 728.95 t,盈余态氮养分总量分别为7 320.51 t和14 566.64 t。

(2)密云、房山损失态氮和盈余态氮养分分布不平衡,房山更为严重,氮养分的亏损与盈余同时并存,氮养分负荷高风险地区均集中在东部地区。密云水库作为北京重要的饮用水源地,其所在地区的盈余氮养分负荷偏高值得引起重视,并采取措施加以改善。房山的盈余氮养分负荷更高,需要尽快加以解决。

(3)化肥氮的过量投入是影响密云、房山地区农田土壤氮素盈余的主要原因之一。由于受到经济利益驱动,缺乏科学合理的配方施肥措施,普遍存在过量施肥现象且在短期内很难迅速扭转。同时由于农户对粮食增产的需求,果树和蔬菜种植区相对集中,土壤氮养分富集还将继续,对水体富营养化的潜在威胁将有增无减。建议采取分类控制办法,推广以流域为单元的面源污染控制综合管理技术,在面源污染严重的水域或流域,因地制宜地制定和执行限定性农业生产技术标准。

(4)为进一步促进密云、房山地区氮养分的平衡,降低氮养分盈余的污染潜势,控制面源污染的发生,需采取一些相关措施:一是优化化学氮肥用量,有机

氮肥与化学氮肥配合施用是降低农田生态系统氮养分污染潜势的最基本措施;二是大力加强“增效”减耗技术,如氮肥深施、碳铵球肥深施、水田以水带氮、钾肥基施等,都是提高肥料利用率、减少肥分损失的有效技术;三是因地制宜地制定合理种植结构和推广农田精准化施肥。

参考文献:

- [1] 黄绍文,金继运,左余宝,等.黄淮海平原玉田县和陵县试区粮田土壤养分平衡现状评价[J].植物营养与肥料学报,2002,8(2):137-143. HUANG Shao-wen, JIN Ji-yun, ZUO Yu-bao, et al. Evaluation of agricultural soil nutrient balance for Yutian county and Lingxian experimental area in Huang-Huai-Hai plain[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2002, 8(2): 137-143.
- [2] 张玉铭,胡春胜,张佳宝,等.太行山前平原农田生态系统氮素循环与平衡研究[J].植物营养与肥料学报,2006,12(1):5-11. ZHANG Yu-ming, HU Chun-sheng, ZHANG Jia-bao, et al. Nitrogen cycling and balance in agricultural ecosystem in piedmont plain of Taihang Mountains[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2006, 12(1): 5-11.
- [3] Ondersteijn C J M, Beldman A G G, Daatselaar C H G. The dutch mineral accounting system and the european nitrate directive: implications for N and P management and farm performance [J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2002, 92: 283-296.
- [4] Oenema O. Governmental policies and measures regulating nitrogen and phosphorus from animal manure in European agriculture[J]. *J Anim Sci*, 2004, 82(E. Suppl.): 196-206.
- [5] Riina Antikainen, Riitta Lemola, Jouni I Nousiainen. Stocks and flows of nitrogen and phosphorus in the Finnish food production and consumption system[J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2005, 107: 287-305.
- [6] YONG Ping-wei, Brian D, Chen D, et al. Balancing the economic, social and environmental dimensions of agro-ecosystems: An integrated modeling approach[J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2009, 131: 263-273.
- [7] 张树清.我国氮磷钾养分与合理施肥技术的研究[J].磷肥与复肥,2004,19(2):65-69. ZHANG Shu-qing. Research on NPK nutrients and rational fertilization technique in China [J]. *Phosphate and Compound Fertilizer*, 2004, 19(2): 65-69.
- [8] 鲁如坤,时正元,施建平.我国南方6省农田养分平衡现状评价和动态变化研究[J].中国农业科学,2000,33(2):63-67. LU Ru-kun, SHI Zheng-yuan, SHI Jian-ping. Nutrient balance of agroecosystem in six provinces in southern China[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2000, 33(2): 63-67.
- [9] 陈明昌,张强,程滨,等.山西省主要农田施肥状况及典型县域农田养分平衡研究[J].水土保持学报,2005,19(4):1-5. CHEN Ming-chang, ZHANG Qiang, CHENG Bin, et al. Fertilizer application survey and farmland nutrient balance of representative counties in Shanxi Province[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2005, 19

- (4):1-5.
- [10] 方玉东. 农田养分收支平衡的研究进展[J]. 山东农业大学学报(自然科学版), 2008, 39(3):492-494.
- FANG Yu-dong. Reserch progress in the farmland nutrient balance of input/output[J]. *Journal of Shandong Agricultural University(Natural Science)*, 2008, 39(3):492-494.
- [11] Oenema O, Kros H, Vries W D, et al. Approaches and uncertainties in nutrient budgets: implications for nutrient management and environmental policies[J]. *European Journal of Agronomy*, 2003, 20(12):3-16.
- [12] 陈敏鹏, 陈吉宁. 中国区域土壤表观氮磷平衡清单及政策建议[J]. 环境科学, 2007, 28(6):1306-1309.
- CHEN Min-peng, CHEN Ji-ning. Inventory of regional surface nutrient balance and policy recommendations in China [J]. *Environmental Science*, 2007, 28(6):1306-1309.
- [13] 王晓燕, 王一岫, 蔡新广, 等. 北京密云水库流域非点源污染现状研究[J]. 环境科学与技术, 2002, 25(4):1-3.
- WANG Xiao-yan, WANG Yi-xun, CAI Xin-guang, et al. Investigation of non-point pollution in watershed of Miyun reservoir[J]. *Environmental Science and Technology*, 2002, 25(4):1-3.
- [14] 马 林. 中国营养体系养分流动循环(CNFC)模型研究[D]. 保定: 河北农业大学, 2006.
- MA Lin. Research on nutrient flow and cycle model in China nutrition system[D]. Baoding: Hebei Agriculture University, 2006.
- [15] 许俊香. 中国“农田-畜牧-营养-环境”体系磷素循环与平衡[D]. 保定: 河北农业大学, 2005.
- XU Jun-xiang. Phosphorus cycling and balance in "Agriculture-Live-stock-Nutrition-Environment" system of China[D]. Baoding: Hebei Agriculture University, 2005.
- [16] 刘晓利. 我国“农田-畜牧-营养-环境”体系氮素养分循环与平衡[D]. 保定: 河北农业大学, 2005.
- LIU Xiao-li. Nitrogen cycling and balance in "Agriculture-Livestock-Nutrition-Environment" system of China[D]. Baoding: Hebei Agriculture University, 2005.
- [17] 张瑞清. 我国农田生态系统养分平衡[D]. 莱阳: 山东莱阳农学院, 2002.
- ZHANG Rui-qing. Agro-ecosystem nutrient balance in China [D]. Laiyang: Laiyang Agricultural College, 2002.
- [18] LIU Xue-jun, JU Xiao-tang, ZHANG Ying, et al. Nitrogen deposition in agroecosystems in the Beijing area[J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2006, 113:370-377.
- [19] JU Xiao-tang, XING Guang-xi, CHEN Xin-ping, 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(PNAS)*, 2009, 106(9):3041-3046.
- [20] 叶 青, 刘衍洪. 浅析兴国县农田 N、P、K 养分现状及对策[J]. 土壤肥料, 2000(5):31-33.
- YE Qing, LIU Yan-hong. Brief analysis Xingguo county farmland N, P, K nutrient present situation and countermeasure[J]. *Fertilizer*, 2000(5):31-33.
- [21] 王激清, 马文奇, 江荣风, 等. 养分资源综合管理与中国粮食安全[J]. 资源科学, 2008, 30(3):415-420.
- WANG Ji-qing, MA Wen-qi, JIANG Rong-feng, et al. Integrated soil nutrients management and China's food security[J]. *Resources Science*, 2008, 30(3):415-420.
- [22] 鲁如坤, 刘鸿翔, 闻大中, 等. 我国典型地区农业生态系统养分循环和平衡研究Ⅳ. 农田养分平衡的评价方法和原则[J]. 土壤通报, 1996, 27(5):197-199.
- LU Ru-kun, LIU Hong-xiang, WEN Da-zhong, et al. Study of the agroecosystem nutrient cycle and balance at the typical area in China IV. The assessment method and the principle of nutrient balance in farmland[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 1996, 27(5):197-199.
- [23] 王激清, 马文奇, 江荣风, 等. 中国农田生态系统氮素平衡模型的建立及其应用[J]. 农业工程学报, 2007, 23(8):210-215.
- WANG Ji-qing, MA Wen-qi, JIANG Rong-feng, et al. Development and application of nitrogen balance model of agro-ecosystem in China[J]. *Transactions of the CSAE*, 2007, 23(8):210-215.