

孙 铖, 周华真, 陈 磊, 等. 东北三省农田化肥氮地下淋溶污染等级评估[J]. 农业资源与环境学报, 2018, 35(5): 405-411.

SUN Cheng, ZHOU Hua-zhen, CHEN Lei, et al. Pollution grade assessment of nitrogen leaching from farmland fertilizer in three northeastern provinces[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2018, 35(5): 405-411.

东北三省农田化肥氮地下淋溶污染等级评估

孙 铖¹, 周华真¹, 陈 磊^{1*}, 沈珍瑶¹, 王洪媛², 刘宏斌²

(1. 北京师范大学环境学院, 北京 100875; 2. 中国农业科学院农业资源与农业区划研究所, 农业部面源污染重点实验室, 北京 100081)

摘 要:本研究以我国东北三省(黑龙江、吉林、辽宁)为研究对象,统计了东北36个市级行政单元的化肥施用情况,分析了东北三省近10年的化肥施用趋势,并利用地理信息系统揭示了化肥施用空间特征。在此基础上,利用氮地下淋溶流失系数估算了农田化肥氮地下淋溶流失量,量化了东北三省各行政单元的氮地下淋溶流失强度。结果表明,近10年我国东北化肥施用量呈上升趋势,吉林省化肥施用强度最高,其次是辽宁省和黑龙江省;氮地下淋溶流失强度的平均值为 $0.314\ 4\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$,氮地下淋溶高流失强度区主要集中在吉林省的长春市、四平市等地区,原因在于吉林省化肥施用量较高,同时玉米产量高,而玉米相对于其他作物,其氮肥施用量和氮素地下淋溶流失系数均处于较高水平。本研究相关方法可用于区域尺度上的农田氮地下淋溶估算,同时研究结果为我国农田面源污染防控和氮素管理提供了数据支持。

关键词:农业面源污染;化肥;氮;流失量;时空分布;等级评估

中图分类号:S143.1

文献标志码:A

文章编号:2095-6819(2018)05-0405-07

doi: 10.13254/j.jare.2017.0318

Pollution grade assessment of nitrogen leaching from farmland fertilizer in three northeastern provinces

SUN Cheng¹, ZHOU Hua-zhen¹, CHEN Lei^{1*}, SHEN Zhen-yao¹, WANG Hong-yuan², LIU Hong-bin²

(1. Department of Environment, Beijing Normal University, Beijing 100875, China; 2. Institute of Agricultural Resources and Regional Planning, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Key Laboratory of Non-point Source Pollution Control, Ministry of Agriculture, Beijing 100081, China)

Abstract: In this study, three northeast provinces, including Heilongjiang Province, Jilin Province and Liaoning Province in China were targeted as the study area, the situation of fertilizer application was collected the trend of fertilizer application was analyzed in the recent ten years based on the collected data of fertilizer of 36 cities. The GIS tool was used in providing the spatial distribution map of nitrogen leaching in this region. On this basis, we utilized the leaching coefficient to estimate nitrogen leaching and quantified leaching intensity for identifying those high-risk regions. The results showed that fertilizer application had been increasing during the past 10 years in three northeast provinces, Jilin Province had the highest intensity of fertilizer application, followed by Liaoning Province and Heilongjiang Province; the average leaching intensity of nitrogen was $0.314\ 4\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$, with highest leaching intensity was centered in Changchun City, Siping City and so on. Because of their higher maize yield with higher fertilizer application is at the highest level in Jilin Province, nitrogen fertilizer demand and nitrogen leaching loss coefficient of maize were higher compared with other crops. This study provided the computing method of nitrogen leaching on the regional scale, and provided data support for prevention of agricultural non-point source pollution and nitrogen management.

Keywords: agricultural non-point source pollution; fertilizer; nitrogen; leaching; spatial and temporal distribution; grade assessment

收稿日期:2017-12-11 录用日期:2018-03-30

基金项目:国家自然科学基金项目(51779010);牛顿基金项目(BB/N013484/1);农业部面源污染控制重点实验室开放基金项目(1610132016005)

作者简介:孙 铖(1994—),女,吉林延边人,硕士研究生,从事农业面源污染研究。E-mail:13756892980@163.com

*通信作者:陈 磊 E-mail:chenlei1982bnu@bnu.edu.cn

农田地表径流和地下淋溶是氮素流失的主要途径。第一次全国污染普查公报显示,农业源总氮排放占全国排放总量的57.2%^[1-2],因此,农田氮素流失已成为治理全国面源污染亟待解决的问题。随着我国农田氮素污染日益严峻,其氮素流失途径研究也受到学者们的广泛关注,大部分研究侧重于地表径流氮素损失,地下淋溶方面因监测困难,仍较为薄弱^[3-4]。Carpenter等^[5]研究表明,淋溶多发生在强降雨或不合理灌溉条件下,溶出的氮磷养分随地下淋溶迁移,造成养分流失从而引发环境污染。其中,铵态氮、硝态氮、亚硝态氮是氮素流失的主要形态,而磷素由于其吸附性强较难发生淋溶迁移^[6]。

东北三省是我国重要的商品粮基地,但在保障粮食安全的刚性需求下,其化肥用量呈现显著增长趋势^[7]。根据吉林、辽宁、黑龙江三省的统计年鉴数据,2005—2015年东北三省的总施肥量从333.24万t增长到485.07万t,增加了46%。化肥的过量施用引发了一系列农业面源污染问题。彭畅等^[7]基于渗漏池方法研究了吉林省玉米田氮素地下淋溶年际间的变化规律,为吉林省农业面源污染治理提供相应参考。研究表明,东北地区已成为农田氮流失和地下水污染的易发区和高发区^[8]。但是,大部分研究采用田间实验法,点位有限,这种单点、局部的研究无法体现区域氮地下淋溶的空间特征。

本文以东北三省为研究区,以市为单位,开展农田化肥地下淋溶氮素流失估算以及污染等级评估研究。东北三省土壤类型以黑土为主,黑土区是我国的粮仓,是我国重要的农业生产基地^[9]。因此,对该区域氮素地下淋溶流失进行等级评估,对防治农业面源污染具有重要意义,有利于保证该区域粮食安全和生态环境可持续。同时,通过污染分级识别重点区域,有助于推行区域化措施,提高面源污染控制效率。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

研究区位于我国东北部,地跨吉林、辽宁、黑龙江三省,共有36个市级行政单元(图1),面积约为 $7.873 \times 10^5 \text{ km}^2$,海拔平均约为200 m,冬季寒冷漫长,夏季温暖而短促,冬季降雪,蒸发小,气候湿润,低地多沼泽^[10]。东北三省属于大陆性季风气候,四季分明、雨热同期,地形以山地、平原、河流为主,平均年降雨量约为767.5 mm。根据《中国统计年鉴》,2013年东北三省的耕地面积为 $2.786 \times 10^7 \text{ hm}^2$,约为全国总耕

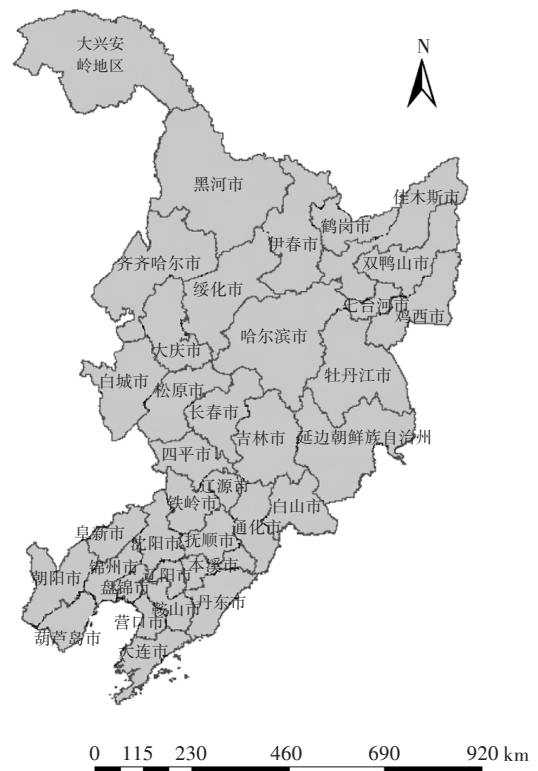


图1 东北地区地理位置及市级行政单元

Figure 1 The location and municipals of three northeast provinces

地面积的11.11%,主要的种植制度为大田一熟。农业生产活动较多,主要种植的农作物有水稻、玉米、大豆等。

1.2 数据资料

本研究的基础数据资料主要包括市级行政单元划分、农作物播种面积、市级化肥折纯量、省级化肥施用数据、地下淋溶流失系数^[11]。主要数据及来源见表1。

表1 主要数据及其来源

Table 1 Main data and sources

数据类型	来源
市级行政单元	中国科学院资源环境科学中心 ^[12]
农作物播种面积	中国经济社会发展统计数据库
农田氮流失系数	《全国农业面源污染流失系数手册》 ^[13]
市级化肥施用数据	《中国统计年鉴》
省级化肥施用数据	中华人民共和国国家统计局

1.3 研究方法

1.3.1 化肥施用量及施用强度的估算方法

本文选取了数据相对完善、年份较近的2013年数据进行化肥施用的空间分布特征分析,由于数据的

不完整性,采用估算的方法对缺失数据进行插补,具体估算方法参考文献[14]。农田氮肥的总施用量包括单一元素肥料和复合肥中氮素有效成分之和。复合肥中氮磷钾有效成分采用通用型化肥比例 15:15:15 进行计算^[12],即:

农田总施氮量(万 t)=氮肥施用量(万 t)+复合肥施用量(万 t)×15% (1)

化肥施用强度表示为单位农作物播种面积的年化肥施用量,相对于化肥施用总量更能直观地反映一个地区的化肥施用状况。氮肥施用强度计算公式:

氮肥施用强度(kg·hm⁻²·a⁻¹)=
氮肥施用量(kg·a⁻¹) / 总农作物播种面积(hm²) (2)

1.3.2 农田化肥氮地下淋溶流失量计算

以农业部《全国农业面源污染流失系数手册》^[13]中的农田氮地下淋溶流失系数为基础,采用加权平均法,测算各个市级行政单元的氮地下淋溶流失系数,具体计算公式如下:

$$\mu = \sum_{i=1}^n \mu_i \times \beta_i$$
 (3)

式中: β_i 为某类种植模式面积占该市农作物总播种面积的比例,%; μ_i 为该类种植模式农田肥料氮地下淋溶流失系数; μ 为该市的农田化肥氮地下淋溶流失系数。

其中《全国农业面源污染流失系数手册》^[13]不同种植模式农田肥料氮流失系数通过大量田间原位监测,按以下公式测算:

$$\mu_i = \frac{RL - CK}{FA} \times 100\%$$
 (4)

式中:RL为常规处理下,即常规施肥状态下农田氮地下淋溶流失量,kg;CK为对照处理农田氮地下淋溶的流失量,kg;FA为氮肥的施用量,kg。因此,农田肥料氮的流失量可由流失系数与氮肥施用量相乘获得。

1.3.3 等级划分标准与方法

对于氮肥施用强度的划分,根据农业部相关数据划定标准。对于氮素地下淋溶流失量及氮素地下淋溶流失强度的等级划分,目前并没有统一标准。为了更好地表现区域的空间差异,利用GIS中的Jenks自

然最佳断裂点分级方法对其进行等级评估,该方法是一种不等值分级方法,以数据分布的自然裂点作为分级的依据,基于让各级别中的变异总和达到最小的原则来确定分级点,其特征就是类内差异最小,而类间差异最大^[15],对于氮肥施用量同样采取该方法,具体划分标准如表2所示。

2 结果与讨论

2.1 化肥施用的时空分布特征

2.1.1 化肥施用的时间变化特征

东北三省 2005—2015 年的化肥施用趋势如图 2 所示。总体来看,黑龙江省、吉林省、辽宁省以及东北三省总体的化肥施用量均呈现上升趋势,但波动较小。黑龙江省、吉林省、辽宁省化肥施用总量范围分别是127.831~212.702、104.743~154.378、100.666~117.991万 t,其中,黑龙江省的化肥施用总量是三省中最高的,约占总数的41.96%,主要原因是黑龙江省为我国的农业大省,也是东北三省中的粮食大户;东北三省的总施肥量从2005年的333.240万 t上升至2015年的485.070万 t,增长幅度达45.56%,表明近10年来东北三省化肥施用量显著提升,由化肥过量施用造成的水质恶化以及富营养化等环境问题也日益显现^[16]。从肥料结构来看,黑龙江、吉林、辽宁三省的氮肥施用量分别约占施肥总量的41.96%、62.69%、66.22%,表明吉林省和辽宁省的氮肥施用占比相较黑龙江省要高,主要原因是吉林省和辽宁省的玉米产量较高,而玉米是需氮量较高的粮食作物。

2.1.2 氮肥施用的空间分布特征

东北地区共有36个市级行政单元,2013年各市的氮肥施用量和施用强度的空间分布如图3所示。从氮肥施用量来看,东北地区中部氮肥施用量最高,从中部向外呈现递减的趋势。原因在于,根据粮食作物区域配方与作物施肥建议中对小麦、玉米、水稻三大粮食作物施氮量建议,玉米是需氮量最高的作物,其次是水稻和小麦。结合中国省级统计年鉴中东北三省三大粮食作物产量的统计,2013年吉林省玉米

表2 各指标等级划分标准
Table 2 Criterion of grading of indexes

等级划分	低	较低	中	较高	高
氮肥施用量/万 t·a ⁻¹	0.329 8~2.826 4	2.826 5~6.799 6	6.799 7~13.732 0	13.732 1~24.620 5	24.620 6~43.105 6
氮肥施用强度/kg·hm ⁻² ·a ⁻¹	4.817 7~102.000 0	102.000 1~180.000 0	180.000 1~237.000 0	237.000 1~280.000 0	280.000 1~641.268 0
氮地下淋溶量/10 ³ t·a ⁻¹	0.000 1~0.044 9	0.045 0~0.097 0	0.097 1~0.203 8	0.203 9~0.366 6	0.366 7~1.402 4
氮地下淋溶强度/kg·hm ⁻² ·a ⁻¹	0.000 8~0.063 8	0.063 9~0.153 7	0.153 8~0.296 6	0.296 7~0.533 3	0.533 4~1.360 3

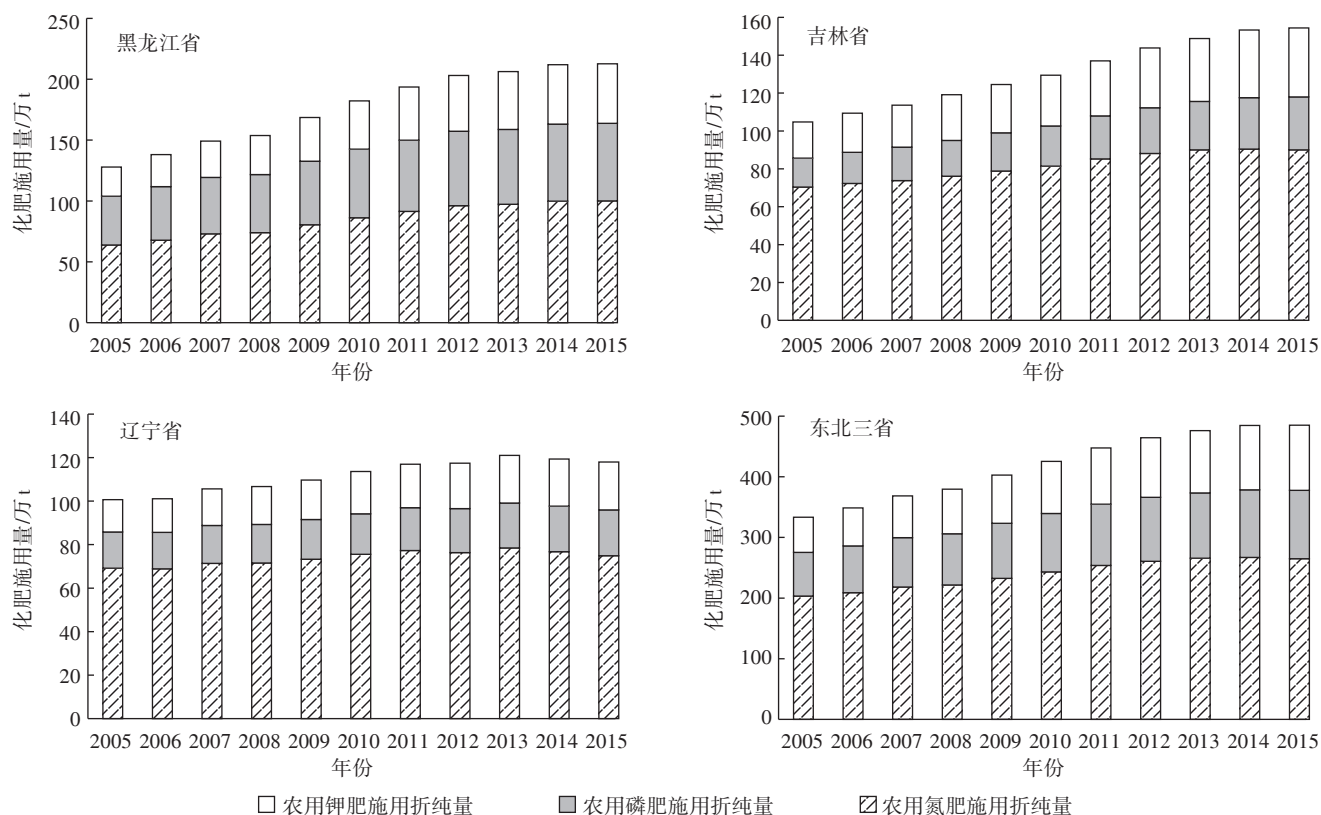


图2 东北三省2005—2015年的化肥施用状况

Figure 2 The variation of fertilizers application from 2005 to 2015 in three northeast provinces

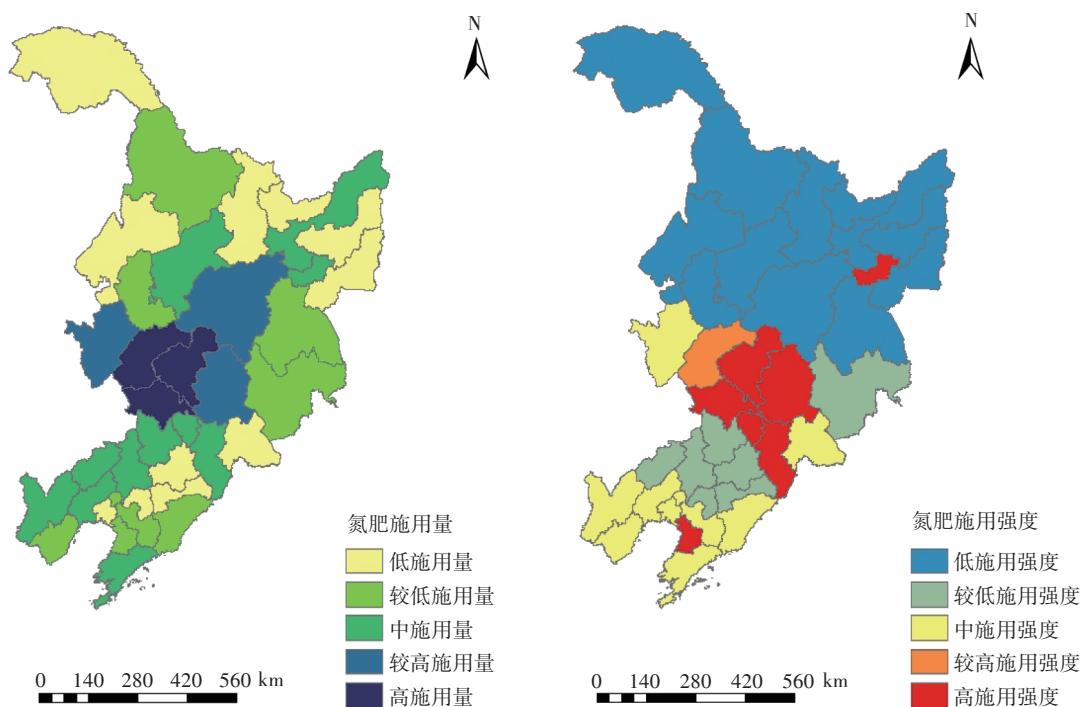


图3 2013年农田氮肥施用量及施用强度空间分布

Figure 3 The spatial distribution of nitrogen fertilizer application and intensity in 2013

产量占三者总和的83.11%,占比最高,其次是辽宁省,黑龙江省占比最低,这和氮肥施用总量的空间特征基本一致。

从氮肥施用强度上来看,七台河市处于黑龙江省氮肥施用强度的最高水平,吉林省中部地区处于该省氮肥施用强度的最高水平,按照高低依次排序为:通化市>吉林市>辽源市>长春市>四平市;吉林省其他地区的氮肥施用强度处于较高水平或中等水平。从整体上来看,吉林省氮肥施用强度高于其他两省,同时吉林省的农田面积也低于其他两省。在保障粮食产量的需求下吉林省化肥施用量显著上升,导致单位面积上氮肥施用呈现增长趋势^[17]。辽宁省的南方地区除营口市处于高化肥施用强度外,大部分地区氮肥施用强度处于中等水平,其化肥施用管理也需要得到相应的重视,尽量做到合理施肥。此外,黑龙江省整体上氮肥施用量及施用强度较低,其中,黑龙江省大兴安岭地区的2013年氮肥施用量仅为0.329 8万t,这与大兴安岭原始森林占地面积较多有关。综上所述,从整体上来看,东北三省氮肥施用强度呈现明显的区域性分布特征,化肥施用强度较高的区域集中在吉林省。

2.2 农田化肥氮地下淋溶流失特征

根据《全国农田面源污染排放系数手册》中的地下淋溶氮流失系数^[13],对2013年东北三省的氮地下流失量进行估算,计算结果如图4所示。东北地区化肥氮地下淋溶流失总量为 $7.179\ 2\times10^3\ \text{t}$,其中最高等级氮流失量约占总量的46.58%。对于化肥氮地下淋溶强度,东北地区的平均值为 $0.314\ 4\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ 。根据彭畅等^[7]的地下淋溶监测结果,东北玉米土壤氮素淋溶强度为 $4.53\sim7.17\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$,其中农田本底氮素流失70%以上,而本研究计算的东北地区化肥氮地下淋溶约占其结果的6%,计算结果相对偏小。可能因为是氮地下淋溶与降雨、施肥以及种植类型等多因素相关,本研究仅探讨了农田化肥的氮素地下淋溶量,未考虑农田本底氮素,东北地区多年施肥导致土壤存留大量氮素,具有长期过量施肥产生的累积影响。同时本研究只对当年的施肥量进行了估算,彭畅等^[7]的研究对2010—2013年的玉米氮素地下淋溶量都进行了研究,不同年份下的肥料投入和降雨情况均有不同。同时,其采样点的主要种植模式为春玉米一年一季连作,以往研究表明,玉米的土壤氮素淋溶强度处于较高水平^[8],在东北的各个作物中玉米的氮素

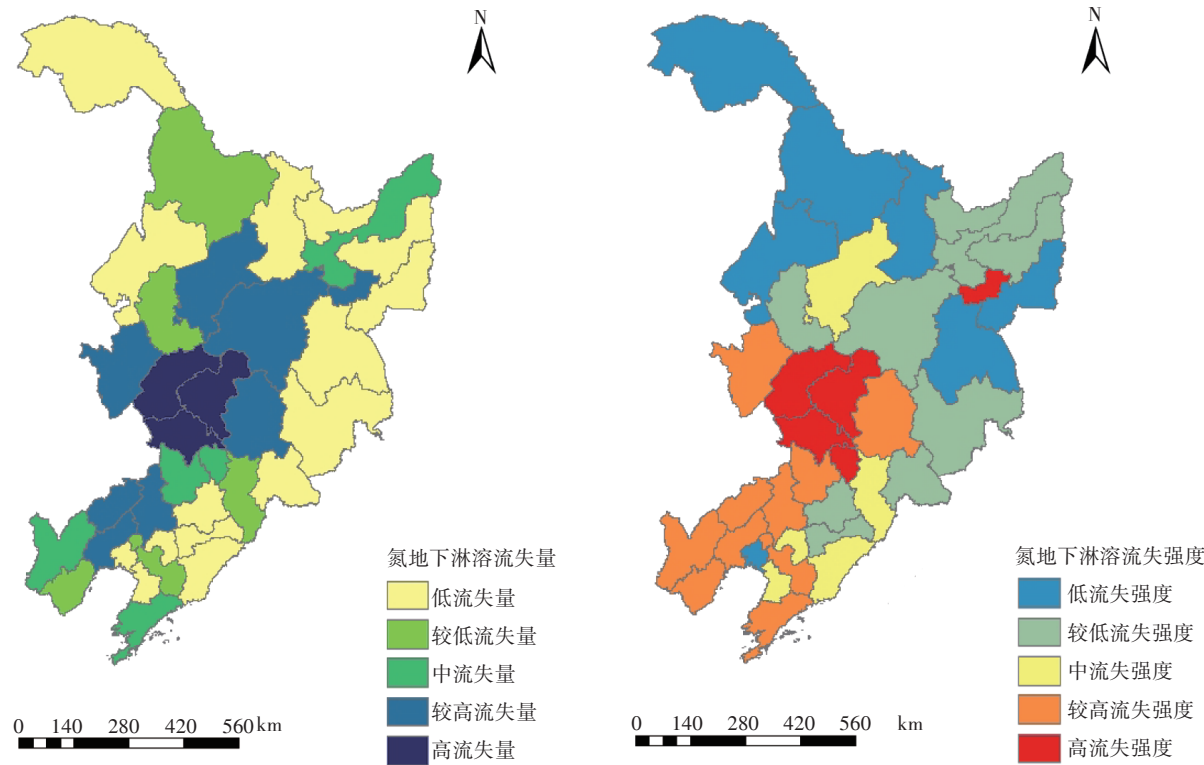


图4 2013年农田地下淋溶氮流失量及流失强度的空间分布

Figure 4 The spatial distribution of nitrogen leaching and loss intensity of nitrogen fertilizer in 2013

淋溶强度最大;而本研究考虑了多种作物的氮地下淋溶,因此估算结果较小,这也从侧面表明基于特定作物类型的地下淋溶估算可能会造成一定的高估现象。

从空间分布来看,2013年东北三省地下淋溶氮流失量的范围在0.1~1 402.4 t内。其中吉林省中部地区拥有3个处于高流失量的市级行政单元,其排序依次为长春市(1.4024×10^3 t) > 四平市(1.0073×10^3 t) > 松原市(9.344×10^2 t)。可以看出吉林省氮地下淋溶量比其他两省高,主要原因在于施肥量是影响氮素地下淋溶量的直接因素^[18],而长春市、四平市、松原市都具有最高水平的施肥量。对比不同种植模式的氮地下淋溶流失系数可知,玉米的氮地下淋溶流失系数高于其他大田作物;吉林省的玉米产量约1600万t,玉米单产水平、人均占有量、商品率及出口量均居全国首位^[7]。而吉林省的白城市和黑龙江省的绥化市、齐齐哈尔市、哈尔滨市也属于氮地下淋溶的较高流失区。黑龙江、吉林、辽宁三省的氮地下淋溶强度分别为0.179 8、0.539 1、0.295 1 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$,吉林省氮地下淋溶流失强度明显高于其他两省,这是因为2013年吉林省的化肥施用量是三省中最高且该省年降雨充沛。黑龙江省的七台河市,吉林省的四平市、长春市、松原市和辽源市处于氮地下淋溶流失强度的最高等级区,氮地下淋溶流失强度分别为1.360 3、1.100 1、1.043、0.772 0、0.738 8 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$,远远高于东北三省氮地下淋溶流失强度的平均水平。吉林省的白城市和吉林市均为较高流失强度区域,辽宁省的大部分地区也处于较高流失等级,而黑龙江省大部分区域氮地下淋溶等级较低。总体来看,研究区氮地下淋溶流失强度处于低级的居多。综上所述,吉林省的长春市、四平市和松原市不仅具有较高的流失量,同样具有较高的流失强度;同时,研究区虽然大部分区域氮流失强度较低,但部分省市流失量仍处于较高水平,因此东北地区的氮地下淋溶流失应受到关注。

从整体结果来看,东北三省大部分地区的氮肥施用强度与氮地下淋溶流失紧密相关,因此防治氮地下淋溶流失的关键在于严格把控化肥施用。对于控制氮肥过量施用,提出以下建议:①对于化肥施用量及化肥施用强度均较高的城市,例如吉林省的长春市、四平市和松原市,建议对整体的施肥方案进行规划,严防过量施肥,同时可适当调整化肥中的磷、钾比例,以提高氮肥的利用率;②对于其氮肥施用量较高但氮肥施用强度处于较低等级的城市,建议重点区域重点施肥,推广测土施肥、配方施肥技术,合理施用

化肥^[19];③对于东北地区的中心城市,例如哈尔滨市,是黑龙江省的政治、经济、文化中心,包括市辖8区10县(市),大部分的农业生产集中于周边农区,应进行相应规划,对其肥料施用采取强制措施,减少农业面源污染,在进行农业生产的同时,维护中心城市的环境^[18];④对于种植玉米的农田,因东北地区雨热同期,在玉米拔节期、追肥期的雨季应严格控制肥料施用,并避免雨前施肥。

3 结论

本研究以东北三省(黑龙江、吉林、辽宁)的36个市级行政单元为研究对象,分析了其化肥施用及其氮地下淋溶量、流失强度的空间分布,并利用Jenks自然最佳断裂点分级方法识别了氮地下淋溶的重点区域。

本研究结果表明,东北地区近10年化肥施用量呈现显著上升趋势,氮地下淋溶流失强度的平均值为0.314 4 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 。从空间特征来看,吉林省部分地区为化肥施用最严重的地区,具有较高的氮地下淋溶流失量及流失强度;而黑龙江省除部分地区外,氮地下淋溶流失量及流失强度均处于较低水平,氮肥施用量与氮地下淋溶流失量紧密相关,因此防治农田氮素地下淋溶污染的关键在于化肥的合理施用。

参考文献:

- [1] 仓恒瑾,许炼峰,李志安,等. 农业非点源污染控制中的最佳管理措施及其发展趋势[J]. 生态科学, 2005, 24(2): 173-177.
CANG Heng-jin, XU Lian-feng, LI Zhi-an, et al. Using best management practices to control agricultural non-point source pollution[J]. *Ecologic Science*, 2005, 24(2): 173-177.
- [2] 姜霞,钟立香,王书航,等. 巢湖水华暴发期水-沉积物界面溶解性氮形态的变化[J]. 中国环境科学, 2009, 29(11): 1158-1163.
JIANG Xia, ZHONG Li-xiang, WANG Shu-hang, et al. Dissolvable nitrogen variation at water-sediment interface during alga blooming process in Chaohu Lake[J]. *China Environmental Science*, 2009, 29(11): 1158-1163.
- [3] 鲁耀,胡万里,雷宝坤,等. 云南坡耕地红壤地表径流氮磷流失特征定位监测[J]. 农业环境科学学报, 2012, 31(8): 1544-1553.
LU Yao, HU Wan-li, LEI Bao-kun, et al. The monitoring of nitrogen and phosphorus loss by surface runoff in sloping red soil fields of Yunnan Province, China[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2012, 31(8): 1544-1553.
- [4] 刘红江,郑建初,陈留根,等. 秸秆还田对农田周年地表径流氮、磷、钾流失的影响[J]. 生态环境学报, 2012, 21(6): 1031-1036.
LIU Hong-jiang, ZHENG Jian-chu, CHEN Liu-gen, et al. The impact of straw application on annual nitrogen, phosphorus and potassium loss in surface runoff of farmland[J]. *Ecology and Environmental Sciences*,

- 2012, 21(6):1031-1036.
- [5] Carpenter S R, Caraco N F, Correll D L, et al. Nonpoint pollution of surface waters with phosphorus and nitrogen[J]. *Ecological Applications*, 1998, 8(3):559-568.
- [6] 马 林, 柏兆海, 胡春胜. “农田氮磷淋溶损失污染与防控机制研究”项目正式启动[J]. 中国生态农业学报, 2016, 24(11):1575-1576. MA Lin, BAI Zhao-hai, HU Chun-sheng. The project of "research on the waste pollution and control mechanism of subrosion loss of nitrogen and phosphorus in farmland" was launched[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2016, 24(11):1575-1576.
- [7] 彭 畅, 朱 平, 张秀芝, 等. 基于渗漏池法研究施肥对东北中部雨养区玉米氮素地下淋溶的影响[J]. 玉米科学, 2015, 23(6):125-130. PENG Chang, ZHU Ping, ZHANG Xiu-zhi, et al. Study of the influence of fertilization on nitrogen leaching underground in northeast central raining area by percolating pools[J]. *Journal of Maize Sciences*, 2015, 23(6):125-130.
- [8] 荆 涛. 东北地区农业面源污染产生原因分析[J]. 科技视界, 2016(25):342. JING Tao. Analysis on the causes of agricultural surface pollution in northeast China[J]. *Science & Technology Vision*, 2016(25):342.
- [9] 陈 群, 耿 婷, 侯雯嘉, 等. 近20年东北气候变暖对春玉米生长发育及产量的影响[J]. 中国农业科学, 2014, 47(10):1904-1916. CHEN Qun, GENG Ting, HOU Wen-jia, et al. Impacts of climate warming on growth and yield of spring maize in recent 20 years in northeast China[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2014, 47(10):1904-1916.
- [10] 侯雯嘉, 耿 婷, 陈 群, 等. 近20年气候变暖对东北水稻生育期和产量的影响[J]. 应用生态学报, 2015, 26(1):249-259. HOU Wen-jia, GENG Ting, CHEN Qun, et al. Impacts of climate warming on growth period and yield of rice in northeast China during recent two decades[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2015, 26(1):249-259.
- [11] 孙 铖, 周华真, 陈 磊, 等. 农田化肥氮磷地表径流污染风险评估[J]. 农业环境科学学报, 2017, 36(7):1266-1273. SUN Cheng, ZHOU Hua-zhen, CHEN Lei, et al. The pollution risk assessment of nitrogen and phosphorus loss in surface runoff from farmland fertilizer[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2017, 36(7):1266-1273.
- [12] 中国科学院资源环境科学数据中心. 中国行政区划数据库[DB/OL].[2017-06-01]. <http://www.resdc.cn>. Data Center for Resources and Environmental Sciences, Chinese Academy of Science (RESDC). Chinese administrative division database[DB/OL].[2017-06-01]. <http://www.resdc.cn>.
- [13] 任天志, 刘宏斌, 范先鹏, 等. 全国农田面源污染流失系数手册[M]. 北京: 中国农业出版社, 2015:8-77. REN Tian-zhi, LIU Hong-bin, FAN Xian-peng, et al. Emission coefficient manual of agricultural non-point source pollution in China[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2015:8-77.
- [14] 陈 梅. 农业面源污染风险评估及分级区划研究[D]. 南京: 南京大学, 2014. CHEN Mei. Risk assessment and regionalization of agricultural non-point source pollution[D]. Nanjing: Nanjing University, 2014.
- [15] 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 Wei-li, TIAN Zhe-xu, ZHANG Ning, et al. The investigation of nitrate pollution in groundwater in north China[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Sciences*, 1995, 1(2):82-89.
- [16] 董 娜, 聂 英. 雾霾天气的成因分析及解决对策: 以长春市为例[J]. 吉林农业, 2013(6):49-50. DONG Na, NIE Ying. The reason analysis and solutions of haze weather: Take Changchun City as an example[J]. *Jilin Agriculture*, 2013(6):49-50.
- [17] 孙彭力, 王慧君. 氮素化肥的环境污染[J]. 环境污染与防治, 1995(1):38-41. SUN Peng-li, WANG Hui-jun. Environmental pollution of nitrogen fertilizer[J]. *Environmental Pollution & Control*, 1995(1):38-41.
- [18] 张国梁, 章 申. 农田氮素淋失研究进展[J]. 土壤, 1998(6):291-297. ZHANG Guo-liang, ZHANG Shen. Research progress on nitrogen leaching of farmland[J]. *Soil*, 1998(6):291-297.
- [19] 周 嘉, 杨 琳, 董美娜, 等. 基于土地利用的哈尔滨市2004—2012年碳排放强度变化分析[J]. 地理科学, 2015, 35(3):322-327. ZHOU Jia, YANG Lin, DONG Mei-na, et al. The analysis of carbon emission intensity in Harbin from 2004 to 2012 based on land use[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2015, 35(3):322-327.