

中国农田氮肥面源污染估算方法及其实证： Ⅲ 估算模型的实证

侯彦林, 赵慧明, 李红英

(中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘要:在总结农田氮肥淋失的一般性规律基础上,建立了农田氮肥淋失的理论模型,具体建立了以下4类模型并进行了实证:施肥量与地下水硝态氮含量关系模型(直接评价模型)、施肥量与土壤硝态氮淋失量关系模型(间接评价模型)、施肥量与土壤硝态氮淋失浓度关系模型(间接模型)、施肥量与土壤硝态氮残留量关系理论模型(间接评价模型)。研究表明:上述4个理论模型和实际模型比较说明,虽然氮的淋失总体上与施氮量正相关,但是不同气候区和土壤条件,其开始淋失或积累的施肥量不同,并且随施肥量增加的趋势(快慢)也不同,因此,必须建立适合于不同区域的模型参数才能实现更准确的淋失预测。但是,从宏观上,也可以通过参数的平均而大体地预测氮的淋失等级或趋势。

关键词:中国;农田氮肥面源污染;估算模型;实证

中图分类号:X501 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-2043(2009)07-1337-04

Estimation and Demonstration of Nitrogen Non-point Pollution in China: III Demonstration of the Model

HOU Yan-lin, ZHAO Hui-ming, LI Hong-ying

(Graduate University of Chinese Academy of Science, Beijing 100049, China)

Abstract: Based on the summarization of the rule of nitrogen leaching loss, a theory model of nitrogen leaching loss was built. The models included the relationships between the fertilization rate with groundwater nitrate, soil nitrate leaching loss, soil nitrate leaching loss concentration and soil nitrate residues. The results showed that there was a positive correlation between nitrogen leaching loss and fertilization rate, but the fertilization rate leading to leaching loss and accumulation of nitrogen varied with different climate and soil conditions, and the rate of nitrogen leaching loss was also different with different fertilization rates. So, determination of the model parameters fitting to different areas was necessary for forecasting nitrogen leaching loss. The average parameters can be used to forecast the grade and rate of nitrogen leaching loss.

Keywords: China; nitrogen non-point pollution; estimating model; demonstration

1 一般性规律的研究结果

1.1 地形地貌与淋失关系

淋失强度和数量:盆地>丘陵>山地;山地中中等坡度流失量最大^[1]。

1.2 土壤质地与淋失关系

淋失强度和数量:砂土>壤土>粘土(如细沙土淋失率为41.5%、重壤为31.2%、粘土为15.0%)。保水能

力:砂土100 mm<壤土150 mm<粘质壤土200 mm<粘土250 mm^[1]。

1.3 氮肥品种与淋失关系

淋失量:硝酸铵>碳酸氢铵>硫酸铵、尿素(尿素是硝酸铵淋失量的一半)>氯化铵^[1]。

1.4 土壤-作物系统对氮的缓冲能力

对氮的缓冲能力:深根系>浅根系;大根系>小根系;小麦>玉米;大田作物和经济作物(水稻、小麦、玉米、棉花)>蔬菜。粘土>壤土>砂土。一般地,水稻有水层情况下处于还原条件,如果有结构坚实的下层,则很少有垂直向下的淋失,一般渗漏量2~3 mm,当施肥量小于300 kg·hm⁻²·season⁻¹时,一般生育期间基本没有污染发生。质地轻的水稻土多在江河沿岸,淋失浓

收稿日期:2008-12-14

基金项目:国家环境保护局资助

作者简介:侯彦林(1959—),男,吉林省人,理学博士,教授,主要从事生态平衡施肥理论、方法和软件以及粮食增产潜力研究。

E-mail:ylhou@263.net

度 $3\sim 5\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,两季可淋失 $23\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,但直接入河流不污染地下水^[1]。

1.5 与硝态氮淋失相关的研究结果

根据马立珊^[2]和邢光嘉^[3]对江南太湖流域的研究结果,28%~32%的井水超过 $10\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,江苏环保监测局在苏州、无锡、常州的结果也是20%~30%井水受到污染,而十多年时间施氮提高了2~3倍,最高达 $300\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,说明施氮与井水无关,可能另有原因;地下水中硝态氮占90%,而河湖铵态氮占80%,测定 δNH_4^+ 自然丰度证明河湖铵态氮来源是有机肥等不是化肥。李荣刚等^[4]的研究表明,江南太湖流域N对水体污染相对贡献率为:人排泄物30.74%,生活废弃物23.8%,畜禽排泄物27.85%,淡水养殖业10.15%,农田径流和淋失7.46%(包括有机肥矿化,真正无机肥很少)。

2 理论模型的假设及其验证

2.1 关于硝态氮淋失量与施肥量关系的研究

在 $Y=f(f,r,a)u,t$ 概念模型中,如果忽略区域内影响因素组合,同时也相当于忽略了 u ;如果视某一年为正常降水(含灌溉)年,则 r 和 t 也可以忽略,则:

$$Y=f(f)r,a,u,t \quad [1]$$

该模型为一元函数模型,它可用于描述某一固定地点平均降水量或灌溉条件下硝态氮淋失量与施肥量的统计关系。这种关系已经被许多研究所证实。

一般情况下,由于土壤-作物系统具有一定程度的缓冲能力,所以,当施肥量超过经济施肥量后才可能发生明显的淋失,假设经济施肥量为 A ,明显产生淋失的施肥量为 B ,则一般土壤条件情况下, $B>A$;并且,当施肥量超过 B 后,淋失呈线性甚至指数形式增加,所以, $Y=f(f,r,a)u,t$ 模型应该为平台加线性或指数模型,以平台加线性表示如下:

$$\begin{aligned} Y &= 0 & \text{当 } f < B \\ Y &= \alpha_f + \beta_f \times f & \text{当 } f \geq B \end{aligned} \quad [2]$$

这一模型符合多数定点研究结果。

2.2 关于硝态氮淋失量与降水或灌溉量关系的研究

在 $Y=f(f,r,a)u,t$ 概念模型中,如果忽略区域内影响因素组合,同时也相当于忽略了 u ;如果同一时期每季施肥量变化不大,则 f 和 t 也可忽略,则:

$$Y=f(r)f,a,u,t \quad [3]$$

该模型为一元函数模型,它可用于描述某一固定地点施肥量变化不大情况下硝态氮淋失量与降水或灌溉量的统计关系,特别能反映不同降水年型下降水

量与淋失的关系。这种关系也已经被许多研究所证实。

一般情况下,只有当降水或灌溉量达到一定程度后土壤-作物系统才发生硝态氮淋失,假如发生明显的淋失的降水或灌溉量为 D ,当超过 D 后淋失呈线性或指数形式增加,以平台加线性模型表示如下:

$$\begin{aligned} Y &= 0 & \text{当 } r < D \\ Y &= \alpha_r + \beta_r \times r & \text{当 } r \geq D \end{aligned} \quad [4]$$

这一模型符合多数研究结果。用它解释土壤硝态氮多年积累最后总要污染地下水的原因。无论是什么气候年型,多年中总会有几次大雨,这几次大雨对硝态氮淋失影响最大。所以,真正影响硝态氮淋失的不是一季总的降水或灌溉量,而是每次的量特别是大雨或超量灌溉的量。

这一模型符合多数定点不同降水年型的研究结果。

2.3 关于硝态氮淋失量与施肥量、降水或灌溉量关系的研究

在 $Y=f(f,r,a)u,t$ 概念模型中,如果忽略区域内影响因素组合,同时也相当于忽略了 u ;则:

$$Y=f(f,r)a,u,t \quad [5]$$

该模型为二元函数模型,它可用于描述大区域范围内硝态氮淋失量与施肥量、降水或灌溉量的统计关系。这种关系研究的较少,然而,如果能建立这种关系,则肥料面源污染的宏观预测和分析就有了科学依据。

一般情况下,可用二元一次函数进行描述,即:

$$\begin{aligned} Y &= 0 & \text{当 } f < B \text{ 或 } r < D \\ Y &= a_f + b_f \times f + c_r \times r + d_{fr} \times f \times r & \text{当 } f \geq B \text{ 和 } r \geq D \end{aligned} \quad [6]$$

式中, d_{fr} 表示施肥量和降水量的交互作用,一般应为正交互。

当 $f < B$ (适宜施氮量), $r \geq D$ 时,由于没有可供淋失的物质,所以基本不会发生氮的淋失;但当 $f \geq B$, $r < D$ 时,虽然当季没有可供淋失的水量,但是氮可在土壤剖面中的上部积累,一旦遇见大雨或过量灌溉,就会发生强烈的淋失,就目前而言,只能说是存在潜在污染。

3 宏观半定量淋失模型的建立

根据国内众多研究结果^[5-7],虽然无法利用统计模型去描述,但可以粗略地得出一些经验性的(半定量)模型。现叙述如下。

由施肥量预测污染的4个模型:一般情况下,当

地点确定后,多年降水或灌溉总量总能保持在一个幅度,这时,淋失量主要与施肥量有关。

3.1 施肥量与地下水硝态氮含量关系的理论模型——直接评价模型

$$Y=0 \quad \text{当 } f < B$$

$$Y=\alpha_f + \beta_f \times f \quad \text{当 } f \geq B \quad [7]$$

此时, $B=150(\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{season}^{-1})$

假设 B (当 $f=B$)=150 时, $Y=0$ (多年如 10 a 地下水累计量,下同)。

假设当 $f=225$ 时, $Y=0$;

假设当 $f=375$ 时, $Y=20 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,

则: $Y=-30+0.1333f$ [8]

理论模型的验证:根据张维理等^[8]在黄淮海地区的研究资料建立的地下水硝态氮含量与施肥量关系如下:

$$Y=-13.72+0.0861f \quad [9]$$

理论模型: $Y=-30+0.1333f$

当 $f=225$ 时, $Y \approx 0$; $f=375$, $Y=20.0$

实际模型: $Y=-13.72+0.0861f$

当 $f=225$ 时, $Y=5.7$; $f=375$, $Y=18.6$

以上结果说明理论模型与实际模型基本吻合,同时也说明实际中在小于 $225 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{season}^{-1}$ 时已经开始影响了地下水水质,理论模型中 $225 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{season}^{-1}$ 施肥量下不影响地下水的假设是不符合实际的。

3.2 施肥量与土壤硝态氮淋失量关系理论模型——间接评价模型

$$Y=0 \quad \text{当 } f < B$$

$$Y=\alpha_f + \beta_f \times f \quad \text{当 } f \geq B \quad [10]$$

此时, $B=150(\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{season}^{-1})$

假设 B (当 $f=B$)=150 时, $Y=0$ 。

假设当 $f=225$ 时, $Y=45 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{season}^{-1}$;

假设当 $f=375$ 时, $Y=70 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{season}^{-1}$,

则: $Y=7.5+0.16667f$ [11]

理论模型的验证 1:根据司友斌等^[9]提供的土壤氮淋失量与施肥量的关系为:

$$Y=16.222+0.136f \quad [12]$$

理论模型: $Y=7.5+0.16667f$

当 $f=225$ 时, $Y=45$; $f=375$, $Y=70.0$

实际模型: $Y=16.222+0.136f$

当 $f=225$ 时, $Y=46.8$; $f=375$, $Y=67.2$

理论模型的验证 2:王庆仁等^[1]发表论文中引用的数据:

$$Y=-7.3333+0.215f \quad [13]$$

理论模型: $Y=7.5+0.16667f$

当 $f=225$ 时, $Y=45$; $f=375$, $Y=70.0$

实际模型: $Y=-7.3333+0.215f$

当 $f=225$ 时, $Y=41.0$; $f=375$, $Y=73.4$

理论模型的验证 3:根据李世清等^[10]在半旱地区研究数据获得:

$$Y=0.032+0.028f \quad [14]$$

理论模型: $Y=7.5+0.16667f$

当 $f=225$ 时, $Y=45$; $f=375$, $Y=70.0$

实际模型: $Y=0.032+0.028f$

当 $f=225$ 时, $Y=6.3$; $f=375$, $Y=10.5$

以上 3 个验证结果说明理论模型与干旱地区实际模型不符合,结果偏大,说明不同气候条件下模型系数需要调整,也说明氮淋失与降水量关系密切。

3.3 施肥量与土壤硝态氮淋失浓度关系理论模型——间接模型

$$Y=0 \quad \text{当 } f < B$$

$$Y=\alpha_f + \beta_f \times f \quad \text{当 } f \geq B \quad [15]$$

此时, $B=150(\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{season}^{-1})$

假设 B (当 $f=B$)=150 时, $Y=0$ 。

假设当 $f=225$ 时, $Y=35 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$;

假设当 $f=375$ 时, $Y=50 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,

则: $Y=12.5+0.1f$ [16]

用实际数据检验:

理论模型的验证 1:根据孙昭荣等^[11]在北京试验数据获得:1 m 土体淋失方程:

$$Y=1+0.15f \quad [17]$$

理论模型: $Y=12.5+0.1f$

当 $f=225$ 时, $Y=35.0$; $f=375$, $Y=50.0$

实际模型: $Y=1+0.15f$

当 $f=225$ 时, $Y=34.8$; $f=375$, $Y=57.3$

以上结果说明理论模型与实际比较吻合。

3.4 施肥量与土壤硝态氮残留量关系理论模型——间接评价模型

$$Y=0 \quad \text{当 } f < B$$

$$Y=\alpha_f + \beta_f \times f \quad \text{当 } f \geq B \quad [18]$$

此时, $B=150(\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{season}^{-1})$

假设 B (当 $f=B$)=150 时, $Y=0$ 。

假设当 $f=225$ 时, $Y=90 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{season}^{-1}$;

假设当 $f=375$ 时, $Y=180 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{season}^{-1}$,

则: $Y=-45.0+0.6f$ [19]

理论模型的验证 1:利用袁新民等^[12]在陕西杨陵

的研究数据获得 0~2 m 土壤硝态氮残留与施肥量关系为:

$$Y = -110.0 + 1.028 \ 3f \quad [20]$$

理论模型: $Y = -67.5 + 0.3f$

当 $f=225$ 时, $Y=90.0$; $f=375$, $Y=180.0$

实际模型: $Y = -110.0 + 1.028 \ 3f$

当 $f=225$ 时, $Y=121.4$; $f=375$, $Y=275.6$

理论模型的验证 2: 根据黄绍敏^[13]在郑州潮土试验结果获得土壤 1 m 土体总氮与施肥量:

$$Y = -43.03 + 0.373 \ 7f \quad [21]$$

理论模型: $Y = -67.5 + 0.3f$

当 $f=225$ 时, $Y=90.0$; $f=375$, $Y=180.0$

实际模型: $Y = -43.03 + 0.373 \ 7f$

当 $f=225$ 时, $Y=41.1$; $f=375$, $Y=97.1$

以上结果说明理论模型预测的结果低于西北半湿润或半干旱区的实际值,但高于河南半湿润区的实际数值,说明西北施氮过多更易于在土壤中残留,这与气候条件密切相关。

上述 4 个理论模型和实际模型比较说明,虽然氮的淋失总体上与施氮量正相关,但是不同气候区和土壤条件,其开始淋失或积累的施肥量不同,并且随施肥量增加的趋势(快慢)也不同,因此,必须建立适合于不同区域的模型参数才能实现更准确的淋失预测。但是,从宏观上,也可以通过参数的平均而大体地预测氮的淋失等级或趋势。

通过上述 4 类理论模型的建立,施肥量与地下水硝态氮含量关系模型(直接评价模型)、施肥量与土壤硝态氮淋失量关系模型(间接评价模型)、施肥量与土壤硝态氮淋失浓度关系模型(间接模型)、施肥量与土壤硝态氮残留量关系理论模型(间接评价模型),得出文章前面总结的一般性规律一致的结果,从而对一般性规律进行了验证,也说明提出的模型是真实可靠的。

参考文献:

- [1] 王庆仁,李继云.论合理施肥与土壤环境的可持续发展[J].环境科学进展,1999,7(2):116-124.
WANG Qing-ren, LI Ji-yun. Fertilizer proper use and sustainable development of soil environment in China[J]. *Advances in Environmental Science*, 1999,7(2):116-124.
- [2] 马立珊,汪祖强.苏南太湖水系农业面源污染及其控制对策研究[J].环境科学学报,1997,17(1):39-47.
MA Li-shan, WANG Zu-qiang. Pollution from agricultural non-point sources and its control in river system of Taihu Lake, Jiangsu[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 1997,17(1):39-47.
- [3] 邢光熹.太湖地区水体氮的污染源和反硝化[J].中国科学(B辑),2001,31(2):130-137.
XING Guang-xi. Pollution source and reverse nitrification of water nitrogen in Taihu area[J]. *Science in China (Series B)*, 2001,31(2):130-137.
- [4] 李荣刚,夏源陵.太湖地区节水灌溉与氮素淋失[J].河海大学学报,2001,29(2):21-25.
LI Rong-gang, XIA Yuan-ling. Water saving irrigation and control of nitrogen leaching in Taihu Lake region[J]. *Journal of Hehai University*, 2001,29(2):21-25.
- [5] 侯彦林.“生态平衡施肥”的理论基础和技术体系[J].生态学报,2000,20(4):653-658.
HOU Yan-lin. Theory and technological system of ecological balanced fertilization[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2000,20(4):653-658.
- [6] 郭胜利,余存祖.有机肥对土壤剖面硝态氮淋失影响的模拟研究[J].水土保持研究,2000,7(4):123-126.
GUO Sheng-li, YU Cun-zu. Simulated test of effects of organic manure on leaching of $\text{NO}_3\text{-N}$ in soil profile[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2000,7(4):123-126.
- [7] 陈皓,章申.黄土地区氮磷流失的模拟研究[J].地理科学,1991,11(2):142-148.
CHEN Hao, ZHANG Shen. Nitrogen and phosphorus movement from loess tillage under modelling the rainfall-runoff erosion processes[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 1991,11(2):142-148.
- [8] 张维理,田哲旭.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):80-87.
ZHANG Wei-li, TIAN Zhe-xu. Investigation of nitrate pollution in ground water due to nitrogen fertilization in agriculture in north China[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Sciences*, 1995,1(2):80-87.
- [9] 司友斌.农田氮、磷的流失与水体富营养化[J].土壤,2000(4):188-193.
SI You-bin. Phosphorous leaching and nutrition pollution in water body[J]. *Soil*, 2000(4):188-193.
- [10] 李世清,李生秀.半干旱地区农田生态系统中硝态氮的淋失[J].应用生态学报,2000,11(2):240-242.
LI Shi-qing, LI Sheng-xiu. Leaching loss of nitrate from semiarid area agroecosystem[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2000,11(2):240-242.
- [11] 孙昭荣.北京降水和土壤下渗水中的氮素研究[J].土壤肥料,1993(2):8-10.
SUN Shao-rong. Researcher of nitrate in precipitation and soil leaching water in Beijing[J]. *Soils and Fertilizers*, 1993(2):8-10.
- [12] 袁新民.不同施氮量对土壤硝态氮累积的影响[J].干旱地区农业研究,2001,19(1):8-13.
YUAN Xin-min. Effect of N-fertilizer rate on soil nitrate nitrogen accumulation[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2001,19(1):8-13.
- [13] 黄绍敏.施氮对潮土地下水硝态氮含量的影响[J].农业环境保护,2000,19(4):228-229.
HUANG Shao-min. Effects of N fertilizer application on content of nitrate-N in soil and underground water[J]. *Agro-Environmental Protection*, 2000,19(4):228-229.