

青铜峡灌区氮素流失试验研究

李强坤^{1,2,3}, 李怀恩¹, 胡亚伟^{2,3}, 孙娟^{2,3}

(1. 西安理工大学水利水电学院, 陕西 西安 710048; 2. 黄河水利科学研究院, 河南 郑州 450003; 3. 水利部黄河泥沙重点实验室, 河南 郑州 450003)

摘要: 针对农业非点源污染氮素流失难以监测控制的具体特点, 基于单元负荷分析, 提出了负荷贡献率的概念, 并在此基础上, 建立了灌区氮素流失估算模型; 利用青铜峡灌区 2005—2006 年灌溉周期灌排水质监测试验资料, 对灌区年氮素流失总氮、硝氮和铵氮流失 3 种形态进行了估算。结果表明, 青铜峡灌区年流失总氮 4.11×10^4 t、硝氮 2.85×10^4 t、铵氮 0.55×10^4 t, 铵氮和总氮分别是黄河干流区间点源污染负荷的 0.28、1.52 倍, 对黄河干流水质影响较大。

关键词: 青铜峡灌区; 氮; 农业非点源污染; 模型

中图分类号: X501 文献标识码: A 文章编号: 1672-2043(2008)02-0683-04

Nitrogen Loss in Qingtongxia Irrigation Area

LI Qiang-kun^{1,2,3}, LI Huai-en¹, HU Ya-wei^{2,3}, SUN Juan^{2,3}

(1. College of Water Resources and Hydro-electric Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China; 2. Yellow River Institute of Hydraulic Research, YRCC, Zhengzhou 450003, China; 3. Key Laboratory of the Yellow River Sediment, Ministry of Water Resource, Zhengzhou 450003, China)

Abstract: Agricultural non-point source pollution is one of the main factors that caused water pollution. However, due to the complex of formation mechanism and migration laws, monitoring and controlling non-point source pollution was very difficult. Irrigation areas were the regions with intense human action and the agricultural non-point source pollution problem was very prominent. Taking Qingtongxia irrigation area as an example, through unit analysis, the concept of the contribution rate of the load was put forward and the estimation model of nitrogen loss was established based on the practical monitoring data. The results showed that for annual nitrogen loss in Qingtongxia irrigation area, total nitrogen 4.11×10^4 t, nitrate nitrogen 2.85×10^4 t, ammonium nitrogen 0.55×10^4 t. Ammonium nitrogen and total nitrogen were 0.28 and 1.52 times as the interzone point source pollution load that greatly impacted yellow river water quality.

Keywords: Qingtongxia irrigation area; nitrogen; agricultural non-point source pollution; model

氮是农田生产力的主要限制因素之一, 大多数情况下施用氮肥都可获得明显的增产效果, 但另一方面, 氮又是重要的环境污染因子。在降水或灌溉过程中, 氮通过地表径流、农田排水和地下渗漏等各种方式进入水体, 形成农业非点源污染, 导致了水体富营养化等许多环境问题^[1,2]。据统计, 由河流运输的氮 60%

来自农业, 瑞典最南端的谢夫灵厄流域, 来自农业的氮占此流域总输入氮量的 84%~87%, 我国苏南太湖流域氮对地表水的污染负荷量高达 2.5×10^4 t·a⁻¹, 占氮素化肥施用量的 16.8%^[3]。因此, 关于氮素流失的产污机理、影响因素及其污染负荷的定量计算和调控对策等研究已引起国内外学者的高度关注和重视^[4-11]。但由于其运移规律和形成机理的复杂性, 使得人们监测、模拟与控制都十分困难。国外从 20 世纪 70 年代开始系统地研究农田非点源污染问题, 历经集总参数模型 (CREAMS^[12]、GLEAMS^[13]等)、分布参数模型 (ANSWERS^[14]、SWRRB^[15]等) 阶段, 近期已呈现出和“3S”等先进科学技术相结合的发展趋势 (SWAT^[16]、

收稿日期: 2007-04-25

基金项目: 国家自然科学基金 (90610030); 黄河水利科学研究院中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金 (HKY-JBYW-2007-16); 水利部黄河泥沙重点实验室开放基金 (2007008)

作者简介: 李强坤 (1968—), 男, 河南灵宝人, 硕士, 高级工程师, 从事生态水文与环境水文、灌区生态环境等方面研究工作。

E-mail: liqiangk@126.com

BASIPNS^[17]等)。我国从20世纪80年代开始非点源污染方面研究工作,针对国外模型理论性强、计算量大、参数复杂、难以在我国推广应用的实际情况,提出了许多简便实用的非点源污染估算和预测方法,如:平均浓度法^[18]、水文估算法^[19,20]以及采用排污口监测和调查统计相结合的方法^[21]等,已被广泛应用于国内非点源污染的预测和估算。

据此本文以青铜峡灌区为例,基于单元负荷分析,提出了负荷贡献率的概念,建立了灌区氮素流失量化估算模型,并应用实际监测资料进行了估算。

1 研究区概况

青铜峡灌区是我国古老的特大型灌区之一,位于宁夏回族自治区北部,黄河上游下段,介于东经105°37'~106°39',北纬37°49'~39°23'之间,地处宁夏银川平原,属黄河河套(前套)平原的重要组成部分。灌区地处干旱地带,年均降水量180~220 mm,年均蒸发量1 000~1 550 mm(E601),是一个没有灌溉就没有农业的地区。1964年,黄河干流兴建的青铜峡水利枢纽极大地改善了当地水资源供给条件,也促进了灌区的发展。现状灌区总土地面积6 239 km²,灌溉面积33.75 × 10⁴ hm²,占总土地面积的54%,并以黄河为界分为河东灌区、河西灌区,涉及宁夏的3个地级市及11个县(市、区)。区内农业种植以稻旱轮作为主,粮食作物包括:春小麦、水稻、玉米;经济作物主要为油料、甜菜等。

近年来,黄河干流水质日益恶化,其中尤以上游宁蒙河段、中游潼关河段更为突出,青铜峡灌区下游石嘴山控制断面是黄河干流水质污染最为严重的断面之一。究其原因,除工业、城市废污水等点源污染集中排放外,大量农田氮、磷等养分流失也是其中一个主要影响因素。

2 材料与方法

2.1 估算模型

2.1.1 氮素贡献率 η_N

氮素贡献率 η_N 指灌区单位面积土地在一定使用条件(土壤类型、作物种植结构、化肥、农药施用量等)下氮素的产出量,可选择相对封闭的独立排水区作为典型代表区,通过监测试验确定。

$$\eta_N = \frac{W_{N,REP}}{A_{REP}} \quad (1)$$

式中: $W_{N,REP}$ 为典型代表区氮的流失量, t; A_{REP} 为典型

代表区面积, hm²。其中 $W_{N,REP}$ 可参照式(2)确定:

$$W_{N,REP}(\bar{C}_{OUT} - \bar{C}_{IN}) \int_0^t Q_{OUT}(t) dt = (\bar{C}_{OUT} - \bar{C}_{IN}) W_{OUT} \quad (2)$$

式中: \bar{C}_{IN} 、 \bar{C}_{OUT} 为典型代表区引、排水中氮的浓度, mg·L⁻¹; t 为典型代表区引排水时段, s; $Q_{OUT}(t)$ 为典型代表区排水流量过程, m³·s⁻¹; W_{OUT} 为典型代表区排水总量, m³。

在时间尺度上, η_N 既可以是一次灌水过程的贡献率,例如冬、春灌等;也可以是一季作物(小麦、玉米等)或者一个灌溉周期(一年或数年)的氮素贡献率,相应地,公式中的各计算参数都应在同样时段内取值。如果计算次灌水过程的氮素贡献率,式(2)中应当扣除次灌溉排水过程中排水口的基流氮素输出量,即:

$$W_{N,REP,ONCE} = (\bar{C}_{OUT} - \bar{C}_{IN}) \int_0^t (Q_{OUT}(t) - Q_{OUT,EVR}(t)) dt = (\bar{C}_{OUT} - \bar{C}_{IN})(W_{OUT} - W_{OUT,EVR}) \quad (3)$$

式中: $Q_{OUT,EVR}(t)$ 为次灌溉排水期间平均基流流量过程,可参考水文学中的斜线分割等方法确定, m³·s⁻¹; $W_{OUT,EVR}$ 为次灌溉排水期间平均基流水量, m³; 其他符号同上。

2.1.2 灌区氮素贡献率 $\bar{\eta}_N$

根据灌区的土壤类型、作物种植结构等特定条件,结合相应典型代表区的氮素贡献率 η_{NSP} , 灌区氮素贡献率 $\bar{\eta}_{NSP}$ 可由下式加权平均得到。

$$\bar{\eta}_N = \frac{\sum_{k=1}^M \eta_{N,k} \times A_k}{A_{TOTAL}} \quad (4)$$

式中: $\eta_{N,k}$ 为灌区 k 类特定条件下典型代表区的氮素贡献率 η_N ; A_k 灌区 k 类特定条件的种植面积, hm²; A_{TOTAL} 为灌区总面积, hm²。

2.1.3 灌区氮素流失

在求得灌区氮素贡献率 $\bar{\eta}_N$ 后,利用(4)式可得出灌区氮素的输出总负荷 $W_{N,TOTAL}$ 。

$$W_{N,TOTAL} = \bar{\eta}_N \times A_{TOTAL} \quad (5)$$

当然,如果一个地区或者一个流域有多个灌区,利用上述模型反复计算就可以得出一个地区或流域氮素的总负荷。

2.2 监测试验

遵循典型性、代表性的原则,2005年冬灌(11月)、2006年春灌(4月)、秋灌(8月)期间在青铜峡灌区

选择相对独立、没有或很少有点源污染物排入的典型代表区6处,分别在灌区引水口、典型代表区排水口末端,按中泓一线法,在水深1/2处应用聚乙烯塑料桶提取水样,水样容量不低于250 mL,水样提取后立即根据分析要求加入保存剂,并在24 h内送往实验室分析。如此,在灌区引水口、典型代表区排水口末端总计提取水样140个。实验室分析时,铵态氮(NH_4^+-N)采用连续流动分析仪(FLAstar 5000 Analyzer FOSS TECATOR)测定,硝态氮(NO_3^--N)用紫外分光光度计测定,总氮(TN)采用凯氏定氮仪(KJELTEC SYSTEM 1026 Distilling Unit)测定。

3 结果与分析

3.1 计算结果

对每次灌溉(冬、春、秋灌)水样分析结果依据灌溉水量进行加权合计,可得到各典型区年氮素输出浓度。统计结果见表1。

利用表1中的浓度监测结果,结合灌溉水量,根据式(1)、式(2)可计算出各典型代表区氮素贡献率。根据各典型代表区控制面积,利用式(4)可得出青铜峡灌区氮素贡献率。见表2。

2005—2006年,青铜峡灌区实灌面积 $30.70 \times 10^4 \text{ hm}^2$,根据表2中应用面积加权所计算出的灌区贡献率,利用式(5)可得出青铜峡灌区2005—2006年硝态氮、铵态氮、总氮流失量见表3。

3.2 结果分析

3.2.1 结果合理性分析

为了检验模型计算结果的合理性,根据监测试验资料应用非点源污染负荷计算常用的平均浓度法进行了检验,二者对比结果见表4。从中可以看出,本文模型计算结果与平均浓度法计算结果十分接近,硝氮、铵态氮计算结果较平均浓度法偏大,总氮计算结果较平均浓度法偏小。其中硝态氮相对误差12.18%,铵态氮相对误差仅4.96%,总氮相对误差15.44%。说明本模型计算结果基本合理。

3.2.2 氮素流失形态分析

从表3中的计算结果可以看出,青铜峡灌区每年流失硝氮 $2.85 \times 10^4 \text{ t}$ 、铵氮 $0.55 \times 10^4 \text{ t}$ 、总氮 $4.11 \times 10^4 \text{ t}$ 。其中硝氮是氮流失的主要形式,占氮流失量的70%,这是因为硝氮主要存在于土壤溶液中,以水溶态为主,并且由于土壤带负电荷,对硝氮的吸附作用

表3 2005—2006年青铜峡灌区氮素流失(t)

Table 3 Nitrogen loss in Qingtongxia irrigation area

项目	氮素贡献率	总负荷
NO_3^--N	0.093	28 551
NH_4^+-N	0.018	5 526
TN	0.134	41 138

表4 模型计算和平均浓度法结果比较分析(t)

Table 4 Comparison of the results of the model and the mean concentration method

项目	模型计算	平均浓度法	绝对误差	相对误差/%
NO_3^--N	28 551	25 450	3 101	12.18
NH_4^+-N	5 526	5 265	261	4.96
TN	41 138	48 650	-7512	-15.44

表1 2005年冬灌—2006年秋灌各监测点水质监测结果

Table 1 Monitoring results of water samples of winter irrigation in 2005 to autumn irrigation in 2006

编号	控制排水口名称	隶属灌区	水样/个	$\text{NO}_3^-\text{N}/\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	$\text{NH}_4^+-\text{N}/\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	$\text{TN}/\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$
0	引水口	青铜峡灌区	8	2.88	0.26	3.28
1	第一排水沟	河西灌区	24	6.85	2.45	8.65
2	永二干沟	河西灌区	20	6.02	2.15	8.12
3	反帝沟	河西灌区	22	5.35	0.56	7.86
4	中干沟	河西灌区	22	7.42	1.24	8.46
5	西排水沟	河东灌区	22	6.52	0.70	7.44
6	南干沟	河东灌区	22	4.88	2.24	7.55

表2 青铜峡灌区氮素贡献率计算结果($\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$)

Table 2 The contribution rate of nitrogen in Qingtongxia irrigation area($\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$)

编号	1	2	3	4	5	6	平均
NO_3^--N	0.098 9	0.118 9	0.060 0	0.074 1	0.080 4	0.086	0.093
NH_4^+-N	0.018 4	0.022 2	0.016 7	0.015 3	0.011	0.016 3	0.018
TN	0.133 5	0.185 1	0.076 6	0.089 4	0.091 3	0.145 6	0.134

很小,灌溉过程中硝氮在径流作用下容易汇入地表水中,造成水体污染。而铵氮则主要以吸附态形式吸附在土壤颗粒表面,土壤颗粒和土壤胶体对铵氮具有很强的吸附作用,从而使得大部分铵氮得以保存在土壤中,只是在特定的条件下,才可能随灌溉水流迁移,因此流失量较小。从年内分布过程看,受农田施肥影响,氮素流失主要以春灌和秋灌为主,可以占到年输出总量的80%以上。

3.2.3 对黄河干流水质影响

在青铜峡灌区排水河段,黄河干流上游水质监测断面为下河沿,下游为石嘴山。根据2005年对下河沿~石嘴山区间点污染源的调查,该区间点源污染入黄铵氮为 1.98×10^4 t、总氮为 2.7×10^4 t,而同时期青铜峡灌区年铵氮和总氮进入黄河干流分别为 0.55×10^4 t、 4.11×10^4 t,分别是点源污染的0.28、1.52倍。近年来,灌区下游石嘴山断面总氮浓度不断上升,与青铜峡灌区氮素流失影响有关。

4 结论

(1) 针对农业非点源污染氮素流失难以监测控制的具体特点,基于单元负荷分析,提出了负荷贡献率的概念,并在此基础上,建立了灌区氮素流失估算模型。

(2) 以青铜峡灌区为例,利用2005年—2006年灌溉周期水质监测试验资料,应用所建模型对灌区年氮素流失总氮、硝氮、铵氮3种形态进行了估算,并与平均浓度法进行比较,结果比较合理。

(3) 计算结果表明,青铜峡灌区年流失总氮 4.11×10^4 t、硝氮 2.85×10^4 t、铵氮 0.55×10^4 t,铵氮和总氮分别是黄河干流区间点源污染负荷的0.28、1.52倍,对黄河干流水质影响较大。

参考文献:

- [1] 谢红梅,朱波. 农田非点源氮污染研究进展[J]. 生态环境, 2003, 12(3): 349-352.
- [2] 王少平,陈满荣,俞立中,等. GIS在农业非点源污染中的应用[J]. 农业环境保护, 2000, 19(5): 289-292.
- [3] 苑韶峰,吕军,俞劲炎. 氮、磷的农业非点源污染防治方法[J]. 水土保持学报, 2004, 18(1): 122-125.
- [4] 周健. 试论农业非点源污染的危害[J]. 农业环境保护, 1990, 9(1): 22-25.
- [5] 于涛,何大伟,陈静生. 黄河流域灌溉农业的发展对黄河水量和水质的影响[J]. 农业环境科学学报, 2003, 22(6): 664-668.
- [6] 陈静生,于涛. 黄河流域氮素流失模数研究[J]. 农业环境科学学报, 2004, 23(5): 833-838.
- [7] 于涛,陈静生. 宁夏农业发展对黄河水质和氮污染的影响[J]. 干旱区资源与环境, 2004, 18(5): 1-7.
- [8] Leon L F, Lam D C, Swayne D A, et al. Integration of a nonpoint source pollution model with a decision support system [J]. *Environmental Modelling & Software*, 2000, 15: 249-255.
- [9] 张兴昌,邵明安. 黄土丘陵区小流域土壤氮素流失规律[J]. 地理学报, 2000, 55(5): 617-626.
- [10] 黄丽,张光远,丁树文. 侵蚀紫色土壤颗粒流失研究[J]. 水土保持学报, 1999, 5(1): 35-39.
- [11] 黄满湘,章申,唐以剑,等. 模拟降雨条件下农田径流中氮素的流失过程[J]. 土壤与环境, 2001, 10(1): 6-10.
- [12] Johson M G, Berg N. A frame work for non-point pollution control in the great Lakes Basin [J]. *Soil and Water Cons*, 1979, 34(4): 68-73.
- [13] Leonard R A, Knisel W G, Still D A. GLEAMS: Ground water loading effects of agricultural management systems [J]. *Transactions of the ASAE*, 1987, 30(5): 1403-1418.
- [14] Beasley D B, Huggins L F, Monke E J. ANSWERS: A Model for watershed planning [J]. *Transaction of the ASAE*, 1980, 23(4): 938-944.
- [15] Williams J R, Nicks A D, Annold J G. Simulation for water resources in rural basins [J]. *ASCE Journal of Hydraulic Engineering*, 1985, 111(6): 970-986.
- [16] Arnold J G, Srinivasan R, Mutiah R S, et al. Large area hydrologic modeling and assessment. Part 1: Model development [J]. *Journal of the American Water Resources Association*, 1998, 34(1): 73-89.
- [17] 马蔚纯,陈立民,李建中,等. 水环境非点源污染数学模型研究进展 [J]. 地理科学进展, 2003, 18(3): 358-366.
- [18] 李怀恩. 估算非点源污染负荷的平均浓度法及其应用 [J]. 环境科学学报, 2000, 20(4): 397-400.
- [19] 陈友媛,惠二青,金春姬,等. 非点源污染负荷的水文估算方法 [J]. 环境科学研究, 2002, 16(1): 10-13.
- [20] 施为光,凌文州. 用实测资料计算流域非点源污染负荷——以四川清平水库为例 [J]. 长江流域资源与环境, 1996, 5(3): 273-277.
- [21] 任立新,冯亚楠,王雁,等. 黄河干流青甘段排污口调查及评价 [J]. 人民黄河, 2005, 27(1): 47-48.