

## 汾河灌区农业面源污染经验统计模型的构建与验证

胡文慧<sup>1</sup> 李光永<sup>1\*</sup> 郭亚洁<sup>2</sup> 贾云茂<sup>3</sup>

(1. 中国农业大学 水利与土木工程学院, 北京 100083;

2. 山西省水文水资源勘测局, 太原 030001;

3. 山西省汾河灌溉管理局, 山西 祁县 030900)

**摘要** 以山西省汾河平原灌区为研究区,根据2004—2008年灌区小店桥和义棠2个水文控制站有限的、离散的径流量和污染物浓度月监测值,采用河流污染物时段通量法分别计算2站点河道断面的总氮(TN)和总磷(TP)年通量,得到灌区TN和TP年负荷量;采用传统输出系数法确定了同期灌区农业种植、农村人口和畜禽养殖等污染源的TN和TP输出量。由此确定了灌区TN和TP迁移过程中的流域损失系数,建立了流域损失系数和年径流模数的非线性关系;构建了包含各类污染源数量、输出系数和年径流模数的灌区农业面源污染经验统计模型;用该模型模拟了2009—2010年灌区的TN和TP负荷量,与实测值相比误差均小于40%,满足精度要求。所建模型适用于我国平原灌区面源污染负荷的估算和预测。

**关键词** 农业面源污染;灌区;时段通量;总氮;总磷;输出系数模型

中图分类号 S 271

文章编号 1007-4333(2015)02-0207-09

文献标志码 A

## Construction and verification of an empirical model for agricultural nonpoint source pollution in the Fenhe irrigation district

HU Wen-hui<sup>1</sup>, LI Guang-yong<sup>1\*</sup>, GUO Ya-jie<sup>2</sup>, JIA Yun-mao<sup>3</sup>

(1. College of Water Resources & Civil Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China;

2. Shanxi Bureau of Hydrology and Water Resources Survey, Taiyuan 030001, China;

3. Shanxi Fenhe Irrigation Administration Bureau, Qixian 030900, China)

**Abstract** Taking the Fenhe plain irrigation district as the study region, yearly flux of total nitrogen(TN) and total phosphorus(TP) from 2004 to 2008 was calculated by period pollutant load flux methods based on the data measured from hydrologic stations in Xiaodianqiao and Yitang. TN and TP emissions from agricultural cultivation, livestock farming and rural life were estimated from the information in the district; watershed loss coefficients of TN and TP were determined, and then a non-linear relationship between watershed loss coefficients and runoff modulus was created. Finally, an empirical model for agricultural non-point source pollution was constructed in the Fenhe Irrigation District. The model was applied to estimate TN and TP load in years 2009 and 2010. Relative errors (RE) of TN and TP between simulated and measured values were all within 40%, which are acceptable for model assessment.

**Key words** agricultural nonpoint source pollution; Irrigation district; period flux; TN; TP; export coefficient model

近年来,化肥与农药的施用,畜禽养殖以及农村生活污水排放等引起的农业面源污染已引起人们的普遍关注。据统计,农业面源污染影响了全世界面积的30%~50%,并且在全世界不同程度退化的

12亿hm<sup>2</sup>耕地中,约12%的耕地由农业面源污染引起<sup>[1]</sup>。我国大中型灌区由于粗放型农作方式,化肥施用量高,畜禽养殖密集,农业面源污染较为严重<sup>[2]</sup>。若将我国大型灌区农药化肥施氮量(实物量)

收稿日期:2014-06-09

基金项目:水利部公益性行业科研专项(200901083)

第一作者:胡文慧,博士,主要从事水文水资源、面源污染等研究,E-mail:hwh1987@cau.edu.cn

通讯作者:李光永,教授,主要从事节水灌溉和人文资源与环境等研究,E-mail:lgyl@cau.edu.cn

按  $403 \text{ kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$  计,氮肥随农田排水和暴雨径流的损失率按 15% 计,则全国大型灌区每年约有近 95.5 万 t 氮肥进入河道和湖泊<sup>[3]</sup>。因此开展污染负荷量化、产输出特点的研究对灌区污染程度评价、水肥管理以及生态环境的良性发展具有重要意义。

河流污染物时段通量估算是计算流域污染物负荷量的基础。理论上,污染负荷时段通量是由污染物浓度和流量乘积在时间上的积分,需记录每个瞬间的流量和浓度值,然而我国的水质的实测频率普遍不高,通常只能获得离散的、时间跨度较大的数据,因此对河流污染物通量的估算往往采用年平均、季节平均等方法<sup>[4]</sup>。时段通量的估算方法大致有 4 种类型:分时段通量、时段平均浓度与时段水量之积、通量频率分布之和、对流——扩散模式等。Webb 等<sup>[5]</sup>利用前 2 类方法,采用实测断面平均浓度、样品时间平均浓度、断面瞬时流量、采样期间平均流量和采样代表平均流量等概念,构造了 5 种时段通量的计算公式。富国<sup>[4]</sup>通过比较分析 Webb 等所构建的几种河流时段通量估算方法的误差,通过实例探讨了河流长时间通量估算方法的使用范围,对估算方法的取舍原则进行了分析。

通过计算机模拟来量化面源污染负荷,被认为是定量评价面源污染的最直接最有效的方法之一。其中统计性经验模型通过对典型样区的监测实验提取数据,建立污染物负荷与降雨、径流、土地利用等水文或景观参数之间的经验关系式。国外已有研究主要集中在基于相关性和回归分析建立的土地利用类型与氮、磷和沉积物入河量的关系<sup>[6]</sup>,降雨、集水面积与非点源负荷的数值关系<sup>[7]</sup>,土地利用、人口密度与氮、磷和泥沙负荷的关系<sup>[8]</sup>,以及采用各污染源输出系数估算污染物负荷(输出系数模型)<sup>[9]</sup>等方面。我国在经验统计模型方面有较多研究,在陕西黑河建立的非点源污染负荷和泥沙数值关系、三峡库区香溪流域降雨量与输沙量和污染物含量的统计关系和滇池各入湖河流水质、水量回归模型<sup>[10]</sup>等。同时,根据我国监测数据少的现状,提出了平均浓度法<sup>[11]</sup>、水质水量相关法<sup>[12]</sup>和降雨量插值法<sup>[13]</sup>等。这类模型不考虑污染物迁移过程,通过对受纳水体的水质分析,依据各影响因子得出非点源污染物输出量,对基础数据要求较低,可利用不多的数据简便地计算流域出口处的污染物负荷量,对于流域面源污染年负荷量的估算特别针对数据缺乏地区具有较

强的实用性<sup>[14]</sup>。其中 Johns 输出系数模型<sup>[15]</sup>是发展较为成熟的经验统计模型之一,该模型通过输出系数建立起土地利用、人类和畜禽牲畜等影响因子与面源污染负荷的关系来计算流域面源污染负荷,对于不同作物的耕地、不同种类的畜禽均采取不同的输出系数,对于人口则根据生活污水的排放及处理水平来确定,不仅在国外有广泛应用,而且已作为一种经典的方法被我国众多学者应用于面源污染负荷的估算研究<sup>[16]</sup>,如在黑河水库<sup>[17]</sup>和太湖流域<sup>[18-19]</sup>的应用等。针对我国特殊的气候和土壤条件,一些学者对 Johns 输出系数法进行了改进。蔡明等<sup>[20]</sup>考虑了降雨、流域损失等因素,将改进后的 Johns 输出系数模型应用到渭河流域,并取得了较好的结果;丁晓雯等<sup>[21]</sup>结合 RS 和 GIS 技术利用 Johns 输出系数模型对长江上游从 20 世纪 60 年代到 2003 年的面源氮素负荷进行了估算;杨淑静等<sup>[22]</sup>考虑灌区灌溉对面源污染的影响,在 Johns 输出系数模型中增加了灌溉因子,利用改进的 Johns 输出系数法计算了宁夏灌区的 TN、TP 负荷,取得较好的结果。

鉴于输出系数法能够反映区域面源污染输出强度,建模方便快捷,满足宏观评估流域面源污染负荷量的研究需要,本研究拟在分析山西省汾河灌区统计资料的基础上,结合灌区实际,探索灌区农业种植、农村生活和畜禽养殖等 3 大污染源输出系数的计算方法;针对灌区缺乏长系列河道断面水质监测数据的状况,利用有限的、离散的流量和污染物浓度月监测值,筛选适宜的时段通量法<sup>[4]</sup>计算灌区进出口河道断面污染负荷年通量,根据进出口河道断面污染负荷年通量差值得到灌区面源污染负荷量;由面源污染输出量和负荷量确定面源污染流域损失系数,探索流域损失系数和年径流模数的非线性关系,最终构建包含年径流模数、各类污染源数量和输出系数的灌区农业面源污染经验统计模型,以期评估汾河灌区农业面源污染提供定量化的计算工具。

## 1 研究区概况

汾河灌区位于山西省太原盆地“底部”,东经  $111^{\circ}55' \sim 112^{\circ}37'$ ,北纬  $37^{\circ}07' \sim 37^{\circ}53'$ 。灌区控制总土地面积约  $13.7 \text{ 万 km}^2$ ,耕地面积约  $10.5 \text{ 万 km}^2$ ,占总面积的 76.3%。在灌区的主河道汾河上分别设置了 3 个节制闸(地方上称为“坝”)将灌区分成一坝、二坝汾东、二坝汾西和三坝 4 个分灌区。每

个分灌区均由各自的干渠从汾河引水,然后由支渠、毛渠配水灌溉田间,排水汇至汾河主河道,灌区排水及河道汇流最终经由灌区出口义棠流出灌区,并在小店桥、义棠设置了水文站,对河流的流量和水质进行监测(图 1)。据监测数据显示,汾河自太原市以下水体完全失去了生态功能,汾河 60%的水已成为劣 V 类。灌区小店桥以上区域主要以太原等城镇点源污染为主,而小店桥以下区域主要以农业面源污染为主。

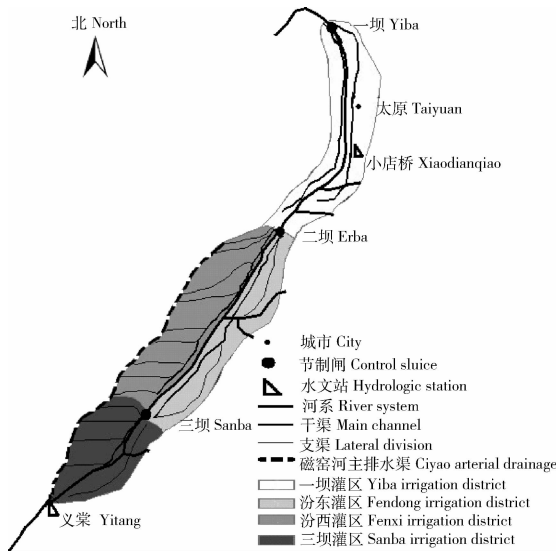


图 1 汾河灌区以及监测站点分布

Fig. 1 Fenhe irrigation district map and hydrologic stations

## 2 研究方法

### 2.1 灌区面源污染负荷年值

灌区面源污染负荷年值是指灌区 1 年内输出的面源污染物负荷伴随降雨径流进入河道、迁移至灌区出口的总负荷量,该值根据灌区进出口河道断面污染负荷年通量求差得到。理论上,污染负荷时段通量由式(1)计算。

$$W = \int Q(t)C(t)dt \quad (1)$$

式中: $Q(t)$ 为瞬时流量; $C(t)$ 为瞬时浓度。利用式(1)计算污染负荷时段通量需记录每个瞬间的径流量和浓度值,然而实际监测只能获得离散的、时间跨度较大的数据,所以一般实际的污染物时段通量根据式(2)计算。

$$W = \sum_{i=1}^n Q_i C_i \Delta t_i = Q_a C_a T + \sum_{i=1}^n Q'_i C''_i \Delta t_i \quad (2)$$

式中: $Q_i$ 为流量; $C_i$ 为污染物浓度; $Q_a$ 为时段平均流量; $C_a$ 为污染物浓度时段平均浓度; $T$ 为估算时段; $Q'_i$ 为时均流量偏差; $n$ 为估算时间段的样品数量。第 1 项为时均流量和时均浓度的乘积项,第 2 项为时均离散项。

Webb 等<sup>[5]</sup>构造了 5 种时段通量的计算公式(表 1)。方法 a 和 b 只包含了式(2)中第 1 项时均流量和时均浓度的乘积项,而忽略了第 2 项时均离散项,方法 c、d 和 e 则两者都包括。富国<sup>[4]</sup>比较分析了几种方法的特点及其适用性(表 1)。

表 1 时段通量的估算方法及适用性

Table 1 Period pollutant load flux methods and characteristics

方法 Method	估算式 <sup>[5]</sup> Formula	方法要点 <sup>[4]</sup> Key points	应用范围 <sup>[4]</sup> Application range
a	$W_a = k \sum_{i=1}^n \frac{C_i}{n} \sum_{i=1}^n \frac{Q_i}{n}$	瞬时浓度 $C_i$ 平均值与瞬时流量 $Q_i$ 平均值的乘积。	第 1 项远大于时均离散项的情况,弱化径流量的作用。
b	$W_b = k \left( \sum_{i=1}^n \frac{C_i}{n} \right) \bar{Q}_r$	瞬时浓度 $C_i$ 平均值与时段平均流量 $\bar{Q}_r$ 之积。	第 1 项远大于时均离散项的情况,强调径流量的作用。
c	$W_c = k \sum_{i=1}^n \frac{C_i Q_i}{n}$	瞬时浓度 $C_i$ 与瞬时流量 $Q_i$ 乘积的平均值,即瞬时通量平均	弱化径流量的作用,较适合点源占优的情况。
d	$W_d = k \sum_{i=1}^n C_i \bar{Q}_p$	瞬时浓度 $C_i$ 与代表时段平均流量 $\bar{Q}_p$ 之积。	强调径流量的作用,较适合面源占优的情况。
e	$W_e = k \frac{\sum_{i=1}^n C_i Q_i}{\sum_{i=1}^n Q_i} \bar{Q}_r$	时段通量平均浓度与时段平均流量 $\bar{Q}_r$ 之积。	强调时段总径流量的作用,较适合面源占优的情况。

注: $k$ 为估算时间段的转换系数; $W$ 为污染负荷时段通量,下标 a、b、c、d、e 表示计算方法;下表同。

Note: $k$  is the conversion coefficient during estimation period; $W$  is period pollutant load, the subscript a, b, c, d and e refer to different calculation methods; The same as in the following table.

关于河流污染物时段通量的估算研究,由于监测频次、监测时间与地点的代表性、分布概率和计算方法的不同,使得计算出来的污染物年通量值相差悬殊,应在深入分析各方法的特点的基础上,结合干流的污染特征选取合适的方法。

本研究根据灌区上游小店桥水文站及出口义棠站的水量、水质(主要是总氮、总磷)监测月数据,并结合污染来源和特征,从表1所列的5种方法中分别筛选出适用于小店桥站和义棠站的1种方法计算相应的污染物年通量;由小店桥站和义棠站断面的污染物年通量求差得到汾河灌区实际的污染物年负荷总量。

## 2.2 灌区农业面源污染经验统计模型

面源污染的形成通常经历“产生-输出-入河”3个过程,各个过程所对应的面源污染物的数量分别称作面源污染物产生量、输出量和负荷量。其中面源污染物产生量是指各类污染源的输入量,如农业种植过程中施入的氮磷量;面源污染物输出总量是指流域各类污染源输出的面源污染物负荷量之和,主要包括土地利用输出、畜禽养殖输出和农村生活输出等,如土地利用输出的污染负荷是指土壤中未被作物吸收利用的氮磷等营养元素在农田灌溉,或有降水发生时随径流流失到农田以外的部分;面源污染物负荷量是指流域输出的面源污染物负荷伴随降雨径流进入河道,流至流域出口的总负荷量。

参考 Johns 输出系数模型<sup>[15]</sup>,灌区面源污染物输出总量利用式(3)计算。

$$L = \sum_{i=1}^n E_i A_i \quad (3)$$

式中: $L$ 为流域内各类污染源输出的面源污染物总量,kg; $A$ 为第 $i$ 类土地利用类型的面积,km<sup>2</sup>,或第 $i$ 类畜禽数量,或者人口数量; $E$ 是第 $i$ 类污染源的输出系数。结合灌区实际,将输出系数确定为农业种植、畜禽养殖和生活排污等3大类输出系数。

对于农业种植,输出系数是指不同土地利用类型单位面积输出的面源污染物总量(kg/(hm<sup>2</sup>·a)),依据单位面积氮磷的施用量和氮磷排放到环境中的排放系数估算,见式(4)。

$$E_{N/P}^j = a_{N/P}^j I_{N/P}^j \quad (4)$$

式中: $E_{N/P}^j$ 为第 $j$ 种土地利用类型的输出系数,kg/(hm<sup>2</sup>·a); $a_{N/P}^j$ 为氮、磷排放系数,即氮磷径流损失量占施肥量的比例; $I_{N/P}^j$ 为每种土地利用类型单位面积施氮(磷)量,kg。

对于畜禽养殖,输出系数是指不同畜禽输出的面源污染物总量;而人类生活污染输出系数是指人类生活输出的面源污染物总量,反映了流域内人们使用含磷清洁剂和饮食水平。人类生活污水排放的输出系数根据人均氮、磷的日排放量,一年的天数和排放系数估算;畜禽养殖的输出系数根据畜禽日排污量、饲养期和排放系数估算,为

$$E_h = a_h D_{ca} P \quad (5)$$

式中: $E_h$ 是人类生活或畜禽产生的面源污染物输出系数,kg/(人·a)或kg/(头·a); $a_h$ 为排放系数; $D_{ca}$ 是每人每天或每只(头)畜禽产生的面源污染物量,kg/d; $P$ 是1年的总天数(365)或畜禽养饲期。

流域输出的面源污染物在输移至流域出口形成面源污染物负荷的过程中,会出现植被截留、生化反应、向大气散发、向地下水渗透和泥沙吸附沉积等现象,从而产生输移损失。对于大尺度流域,由于输移环境复杂且输移路径长,输移损失所占比重较大,在计算流域出口污染负荷时不可忽视<sup>[23]</sup>。因此,在式(3)的基础上,引入流域输移损失系数 $\lambda$ ,用以表征降水、产流、汇流等将流域输出的面源污染物转换成流域出口面源污染负荷的强弱程度<sup>[20,23]</sup>。因此用于计算流域出口面源污染负荷的公式可表示为

$$L_0 = \lambda \sum_{i=1}^n E_i A_i \quad (6)$$

式中: $L_0$ 为流域出口面源污染负荷,kg。 $\lambda$ 为流域损失系数,体现了面源污染物从输出到迁移至流域出口的损失比例,取值范围为0~1.0。

一般 $\lambda$ 可以通过田间试验得到,但对于大型流域来说,由于面积较大、下垫面情况复杂,试验不但耗资巨大,而且结果也未必准确。据 Behrendt<sup>[24]</sup>的研究成果, $\lambda$ 可利用年径流模数计算。

$$\lambda = \frac{1}{1 + aq^b} \quad (7)$$

式中: $q$ 为年径流模数,m<sup>3</sup>/(s·km<sup>2</sup>); $a$ 和 $b$ 是非线性拟合系数。

本研究利用2004—2008年水文站实测数据得到流域出口面源污染负荷监测值 $L_0$ ,利用式(3)计算得到同期流域输出的面源污染物总量 $L$ ,进而得到相应的流域损失系数 $\lambda$ ,根据式(7)结合2004—2008年径流模数 $q$ ,通过非线性拟合得到系数 $a$ , $b$ ,进而构建灌区农业面源污染经验统计模型(式(6)),再利用灌区2009—2010年水文站实测数据对模型

进行验证。

### 3 模型构建与验证

#### 3.1 汾河灌区面源污染物负荷年值

由于灌区小店桥以上区域主要以太原等城镇点源污染为主,而小店桥以下区域主要以农业面源污染为主,因此汾河灌区农业面源污染年负荷即可认为是义棠站和小店桥站断面的污染物年通量之差。

##### 3.1.1 小店桥河段 TN 和 TP 年通量计算

小店桥是国控断面,对于水文水质的监测是每月 1 次,2004—2008 年总氮和总磷浓度平均值分别为 32.55 和 2.77 mg/L,严重超过 GB 3838—2002《地表水环境质量标准》V 类水相应的标准限值(TN

为 2.0 mg/L,TP 为 0.4 mg/L)<sup>[25]</sup>。利用表 1 中 5 种计算河段通量的方法,得到小店桥断面 TN、TP 年通量(表 2)。可看出,采取不同计算方法得到污染物数值不同,但总体而言不存在数量级上的巨大差异,认为计算结果是可信的。运用 Excel 统计软件对 TN、TP 浓度与流量进行相关性分析,相关系数  $R^2$  分别 0.015 和 0.035,即污染物 TN、TP 浓度与流量相关性不显著,同时灌区小店桥以上的区域,点源污染情况比较突出。因此弱化径流量作用和强调点源污染的方法 c 方法比较适合,因而小店桥河段 2004—2008 年的 TN 年通量分别为 2 950.85、4 453.77、8 308.32、4 428.96 和 4 441.88 t,TP 年通量分别为 78.71、74.38、110.07、216.34 和 156.45 t。

表 2 5 种方法计算的小店桥 TN 和 TP 年通量

Table 2 Calculated yearly flux of TN、TP in Xiaodianqiao

t

年份 Year	TN					TP				
	$W_a$	$W_b$	$W_c$	$W_d$	$W_e$	$W_a$	$W_b$	$W_c$	$W_d$	$W_e$
2004	3 454.16	4 858.25	2 950.85	3 696.98	4 150.34	48.58	68.32	78.71	48.73	64.46
2005	4 621.95	4 845.83	4 453.77	4 221.70	2 518.27	103.39	108.40	74.38	71.86	76.12
2006	8 632.84	11 519.97	8 308.32	11 340.07	7 158.24	240.79	221.32	110.07	243.21	119.04
2007	3 368.47	4 832.24	4 428.96	2 842.94	4 163.56	260.23	198.87	216.34	178.22	198.54
2008	4 794.06	3 368.61	4 441.88	3 345.53	4 668.97	188.33	386.29	156.45	152.24	490.62

##### 3.1.2 义棠站河段 TN 和 TP 年通量计算

对于义棠站,仅有每年 3、5、8、10 月份的水质监测数据。2004—2008 年总氮和总磷浓度平均值分别为 42.55 和 1.37 mg/L。汾河灌区段 11、12 月及次年 1、2 月为枯水期,3、7、8、9 月为丰水期,4、5、6、10 月为

平水期,其中 3 月为解冻期。而由于灌区每年 3 月底、4 月初进行春灌,对于汾河下游段,3 月份的径流并不大。因此在使用方法 d 计算的时候,将代表时段划分成 1—3 月、4—6 月、7—9 月、10—12 月。表 3 示出 5 种方法计算得到的义棠断面 TN 和 TP 年通量结果。

表 3 5 种方法计算的义棠站 TN 和 TP 年通量

Table 3 Calculated yearly flux of TN and TP in Yitang

t

年份 Year	TN					TP				
	$W_a$	$W_b$	$W_c$	$W_d$	$W_e$	$W_a$	$W_b$	$W_c$	$W_d$	$W_e$
2004	9 004.10	10 683.86	7 367.46	7 949.32	11 655.86	244.17	193.14	210.00	243.80	245.31
2005	11 115.58	9 572.36	9 869.35	9 854.52	6 669.50	275.89	282.14	198.87	265.97	207.10
2006	15 918.95	17 721.24	16 075.58	14 379.09	11 086.93	379.78	387.25	250.03	316.75	293.61
2007	17 543.20	15 783.24	11 254.34	11 164.10	9 876.54	365.48	456.21	356.78	448.30	365.89
2008	11 360.05	11 307.23	13 410.08	11 423.27	13 392.75	448.58	368.32	345.83	407.50	464.46

由于灌区农业活动密集,农业面源污染情况突出,而面源污染的污染物产生量与径流量的大小有关<sup>[26]</sup>。因此,突出径流量作用以及面源污染的方法 b、d 和 e 比较适合。 $W_a$  和  $W_b$  比  $W_c$ 、 $W_d$  和  $W_e$  大,

说明时均离散项是负的。方法 b 没有考虑时均离散项,方法 e 强调了时段总径流量的作用,然而义棠月流量分布不均,大多数月份流量较低,使得用方法 e 估算结果偏小。故方法 d 比较合适,因而义棠河段

2004—2008年的TN年通量分别为7 949.32、9 854.52、14 379.09、11 164.10和11 423.27 t,TP年通量分别为243.80、265.97、316.75、448.30和407.50 t。

利用义棠河段年通量减去小店桥河段年通量,得到2004—2008年的汾河灌区迁移至灌区出口的TN负荷分别是4 998.47、5 400.75、6 070.77、6 735.14和6 981.39 t,TP负荷分别是165.09、191.59、206.68、231.96和251.05 t。

### 3.2 汾河灌区各类污染源的输出系数

#### 3.2.1 农业种植输出系数

不同农业种植的输出系数是指单位面积面源污染物负荷的年输出量,依据化肥施用量(折纯为总氮和总磷量)和排放系数估算(式(4))。本研究中化肥

施用量根据灌区实际施肥总量折纯得到;氮和磷排放系数按照全国第一次污染源普查农业污染源肥料流失系数手册以及相关文献,分别按12.95%和0.8%估算<sup>[27]</sup>。

灌区内大部分土地一年一熟,农作物主要是春玉米和冬小麦。根据山西省汾河管理局提供的太原尖草坪区、晋中平遥县和吕梁交城县施肥量调查数据,春玉米、冬小麦基肥分别以磷酸氢钙和复合肥为主,追肥均以尿素为主,具体施肥折纯量见表4,春玉米和冬小麦年平均施氮折纯量248.5 kg/hm<sup>2</sup>,磷肥为97.5 kg/hm<sup>2</sup>。根据式(4),由化肥折纯量和排放系数确定的春玉米和冬小麦的总氮输出系数分别为32.76和31.60 kg/(hm<sup>2</sup>·a),总磷输出系数分别为0.84和0.72 kg/(hm<sup>2</sup>·a)。

表4 汾河灌区春玉米和冬小麦农田施肥制度

Table 4 Fertilization of spring corn and winter wheat in Fenhe Irrigation District

施肥种类 Fertilizer type	施肥时间 Fertilizing time	施肥量/(kg/hm <sup>2</sup> ) Fertilizing amount			
		春玉米 Spring corn		冬小麦 Winter wheat	
		TN	TP	TN	TP
基肥 Base fertilizer	播种前 Before sowing	0	105	60	90
追肥 Top dressing	拔节期 Jointing stage	253	0	184	0

#### 3.2.2 畜禽养殖输出系数

各类畜禽粪尿输出系数是指每头(只)畜禽1年内产生的面源污染物负荷输出量,主要是指畜禽粪尿产生的全氮、全磷污染。根据个体日产粪(尿)量、禽畜粪(尿)中污染物平均含量、饲养期、排放系数估算(式(5))。依据杨淑静<sup>[22]</sup>和攀华<sup>[27]</sup>的研究,确定各类畜禽平均每天粪尿排泄量、粪尿中污染物平均含量(表5)。由于山西省年鉴统计

的各类畜禽头(只)数是年末存栏量,故各类畜禽的生长期均采用365 d。参考相关研究成果,并考虑汾河灌区干旱少雨,蒸发量大的情况,确定畜禽粪便排、尿液的排放系数分别为0.03和0.40。根据以上数据,由式(5)计算得到大牲畜、羊、猪粪尿总氮输出系数分别是14.88、2.51和0.94 kg/(头·a);总磷输出系数分别是:0.69、0.21和0.04 kg/(头·a)。

表5 各类畜禽粪尿的污染物平均含量

Table 5 Average concentration of TN and TP in livestock and poultry excrement

畜禽种类 Livestock and poultry species	排泄物 Excreta	日产量/kg Daily production	平均含量/(kg/t) Average content	
			TN	TP
大牲畜 Large animal	粪 Excrement	25	5.5	1.2
	尿 Urine	10	9.2	0.3
猪 Pig	粪 Excrement	3.5	8.1	2.9
	尿 Urine	3.5	4.3	0.2
羊 Sheep	粪 Excrement	2.6	13.7	0.9
	尿 Urine	0.5	7.5	0.2

### 3.2.3 农村生活输出系数

农村生活面源污染物负荷输出系数是指每人 1 年内产生的面源污染物负荷输出量,分为人类粪尿输出系数和生活污水输出系数。资料显示,1 个标准体重的正常人,24 h 总尿量约 1 600~2 400 mL,排便小于 150 g。本研究取人均粪尿排出量为 2 kg/d。根据山西省第一次全国水利普查技术报告,山西省农村人均日取水量控制住 100 L<sup>[28]</sup>,而我国农村人均污水产生量没有明确的标准,根据我国住房和城乡建设部 2010 年 9 月印发的《华北地区农村生活污水处理技术指南》,农村污水排放量一般取水量的 60%~90%<sup>[29]</sup>,本研究取人均生活污水排出量为 60 kg/d。国家环保局调查数据显示,人粪尿一般含全氮 0.5%~0.8%,含磷 0.2%~0.3%,人均日排出生活污水的含氮量为 5 g,含磷量为 0.44 g<sup>[22]</sup>。根据以上数据计算得到人均年排粪尿含氮、磷量分别是 3.5 和 0.07 kg,生活污水排氮、磷量分别为 1.8 和

0.05 kg。根据相关研究成果,人粪尿的排放系数取 0.22;灌区没有污水排放系统,农村生活污水大部分直接进入水环境中,故其排放系数取 0.90。由此,根据式(5),由人均粪尿、生活污水排出量,总氮、总磷含量和排放系数计算得到汾河灌区生活污染产生的氮和磷输出系数为 2.39 和 0.06 kg/(人·a)。

### 3.3 汾河灌区面源污染物输出总量

根据山西省统计年鉴资料、汾河志以及实际调查资料得到 2004—2008 年灌区耕地面积、畜禽养殖数量和人口数量(表 6)。

根据表 6 统计的农业种植面积、畜禽养殖数量和人口数量,结合各类污染源的输出系数,利用式(3)计算得到 2004—2006 年灌区 TN 和 TP 年输出量(表 7)。2004—2008 年汾河灌区 TN 输出量分别为 8 149.04、8 702.32、8 558.20、8 628.21 和 8 569.89 t,TP 输出量分别为 276.53、309.01、300.85、305.21 和 302.47 t。

表 6 2004—2008 年灌区作物种植面积、畜禽养殖数量和农村人口统计  
Table 6 Crop land area, rural population and livestock numbers in 2004—2008

污染源 Pollution source	类别 Category	年份 Year				
		2004	2005	2006	2007	2008
农村生活 Rural life	人口 Population	1.06 × 10 <sup>6</sup>	1.07 × 10 <sup>6</sup>	1.07 × 10 <sup>6</sup>	1.07 × 10 <sup>6</sup>	1.07 × 10 <sup>6</sup>
种植业 Crop farming	玉米/hm <sup>2</sup> Corn	6.96 × 10 <sup>4</sup>	7.33 × 10 <sup>4</sup>	7.76 × 10 <sup>4</sup>	7.69 × 10 <sup>4</sup>	7.70 × 10 <sup>4</sup>
	小麦/hm <sup>2</sup> Wheat	3.49 × 10 <sup>4</sup>	3.13 × 10 <sup>4</sup>	2.70 × 10 <sup>4</sup>	2.65 × 10 <sup>4</sup>	2.64 × 10 <sup>4</sup>
畜禽养殖 Livestock and poultry	大牲畜/头 Large animal	0.87 × 10 <sup>5</sup>	1.06 × 10 <sup>5</sup>	1.01 × 10 <sup>5</sup>	1.06 × 10 <sup>5</sup>	1.05 × 10 <sup>5</sup>
	猪/头 Pig	2.86 × 10 <sup>5</sup>	3.63 × 10 <sup>5</sup>	3.44 × 10 <sup>5</sup>	3.47 × 10 <sup>5</sup>	3.45 × 10 <sup>5</sup>
	羊/头 Sheep	2.35 × 10 <sup>5</sup>	2.80 × 10 <sup>5</sup>	2.59 × 10 <sup>5</sup>	2.83 × 10 <sup>5</sup>	2.42 × 10 <sup>5</sup>

### 3.4 汾河灌区农业面源污染经验统计模型构建与验证

由 2004—2008 年灌区出口 TN 和 TP 负荷监测年值和灌区 TN 和 TP 污染输出量的比值计算得到同期的 TN、TP 流域损失系数 λ<sub>N</sub> 和 λ<sub>P</sub>,用式(7),对 2004—2008 年汾河灌区年径流模数 q 和同期的 TN、TP 的流域损失系数 λ<sub>N</sub>、λ<sub>P</sub> 进行非线性回归分析(相关系数分别为 0.85 和 0.77),可得到 λ<sub>N</sub> 和 λ<sub>P</sub> 的表达式:

$$\lambda_N = \frac{1}{1 + 8.66 \times 10^{-5} \times q^{-1.52}} \quad (8)$$

$$\lambda_P = \frac{1}{1 + 7.0 \times 10^{-5} \times q^{-1.57}} \quad (9)$$

将式(8)和(9)代入式(6)即可得到汾河灌区面源污染负荷(TN、TP)的计算公式:

$$L_N = \frac{1}{1 + 8.66 \times 10^{-5} \times q^{-1.52}} \sum_{i=1}^n E_{Ni} A_i \quad (10)$$

$$L_P = \frac{1}{1 + 7.0 \times 10^{-5} \times q^{-1.57}} \sum_{i=1}^n E_{Pi} A_i \quad (11)$$

式中: L<sub>N</sub> 和 L<sub>P</sub> 为指迁移至灌区出口的 TN 和 TP 负荷量,kg;q 为年径流模数,m<sup>3</sup>/(s·km<sup>2</sup>); E<sub>Ni</sub> 和 E<sub>Pi</sub> 为第 i 种土地利用类型或第 i 类畜禽,或者人的 TN 和 TP 输出系数; A<sub>i</sub> 是为第 i 类土地利用类型的面积(hm<sup>2</sup>)或第 i 类畜禽数量,或者人口数量。利用 2009—2010 年的实测数据对模型进行验证。

表7 2004—2008年灌区各类污染源的TN和TP输出量  
Table 7 Annual emissions of TN and TP in years 2004—2008

污染源 Pollution source	类别 Category	年份 Year									
		2004		2005		2006		2007		2008	
		TN	TP	TN	TP	TN	TP	TN	TP	TN	TP
农村生活 Rural life	人口 Population	2 533.40	63.60	2 557.27	64.20	2 557.32	64.20	2 557.30	64.20	2 557.30	64.20
种植业 Crop farming	玉米 Corn	2 281.93	58.50	2 400.01	61.53	2 540.86	65.14	2 519.24	64.60	2 522.52	64.68
	小麦 Wheat	1 103.15	25.14	989.23	22.54	853.43	19.45	837.40	19.08	834.24	19.01
畜禽养殖 Livestock and poultry	大牲畜 Large animal	1 292.60	59.92	1 580.55	73.27	1 500.28	69.55	1 577.28	73.14	1 562.40	72.45
	猪 Pig	717.35	59.96	912.24	76.25	863.12	72.14	870.97	72.87	865.95	72.45
	羊 Sheep	220.62	9.41	263.02	11.22	243.20	10.37	266.02	11.32	227.48	9.68
合计 Total		8 149.04	276.53	8 702.32	309.01	8 558.20	300.85	8 628.21	305.21	8 569.89	302.47

采用河道时段通量计算得到的2009和2010年灌区实际的农业面源TN负荷分别为10 185.93和9 006.49 t, TP负荷分别为216.53和218.78 t。据山西统计年鉴统计的2009和2010年灌区各类污染源数量,结合各类污染源的TN和TP输出系数,以及2009和2010历年的年径流模数,利用构建的灌

区输出系数模型(式(10)和(11)),得到汾河灌区2009和2010年TN和TP负荷模拟值(表8)。TN和TP年负荷量模型模拟值与实测值相对误差分别控制在40%和30%以内,在监测数据缺乏的条件下,对于面积>1 000 km<sup>2</sup>的中等区域的面源污染评价,模型精度是可以接受的<sup>[30]</sup>。

表8 2009—2010年灌区TN、TP负荷模拟值与实测值  
Table 8 Observed and simulated annual TN and TP loads in year 2009—2010

年份 Year	TN			TP		
	实测值/t	模拟值/t	相对误差/%	实测值/t	模拟值/t	相对误差/%
	Measured value	Simulated value	Relative error	Measured value	Simulated value	Relative error
2009	10 185.93	6 084.05	-40.27	216.53	152.76	-29.45
2010	9 006.49	6 083.82	-32.45	218.78	158.68	-27.47

## 4 结论

汾河灌区面源污染研究基础薄弱、实测数据缺乏,本研究利用2004—2008年灌区上游小店桥站以及灌区出口义棠站少量不连续的流量、TN和TP浓度月监测数据,分别利用河流污染物时段通量法和输出系数法计算了汾河灌区TN、TP污染负荷年值和年输出量,通过建立面源污染流域损失系数与年径流模数的非线性关系,构建了包含各类污染源数量、输出系数和年径流模数的灌区农业面源污染经验统计模型。

利用该模型模拟的2009和2010年灌区农业面源TN负荷分别为6 084.05和6 083.82 t, TP负荷分别为152.76和158.68 t,与实测值相比误差均在40%以内,表明所构建的模型可以用来预测灌区的农业面源污染年负荷量。用于模型构建的年份虽然包含了丰平枯水文年,但由于数据系列不够长,模型精度还需要进一步验证。包括径流模数和流域损失系数之间的非线性相关系数( $a$ 和 $b$ )需由长系列的水质和水量实测数据进行校准,模型中的各类污染源输出系数 $E_i$ 还需进一步开展田间试验验证。



## 参 考 文 献

- [1] Dennis L, Corwin K. Nonpoint pollution models based on GIS [J]. *Soil & Water Conservation*, 1998 (1):78-88
- [2] 杨淑静, 张爱平, 杨正礼, 等. 宁夏灌区农业非点源污染负荷估算方法初探[J]. *中国农业科学*, 2009, 42(11):3947-3955
- [3] 詹红丽, 李丹, 郭富庆. 大型灌区面源污染现状调研及成因规律分析[J]. *中国农村水利水电*, 2011(3):17-20, 25
- [4] 富国. 河流污染物通量估算方法分析(I):时段通量估算方法比较分析[J]. *环境科学研究*, 2003, 16(1):1-4
- [5] Webb B W, Phillips J M, Walling D E, et al. Load estimation methodologies for British rivers and their relevance to the LOIS RACS(R) programme [J]. *The Science of the Total Environment*, 1997(194/195):379-389
- [6] Haith D A. Land use and water quality in New York river [J]. *Journal of the Environmental Engineering Division*, 1976, 102(1):1-15
- [7] Patrick L B, Teresa H S. Analysis and predictive models of stormwater runoff volumes, loads, and pollutant concentrations from watersheds in the twin cities metropolitan area, Minnesota, USA [J]. *Water Research*, 2002(36):1743-1757
- [8] Dylan S A, Richard W S, Randy A D, et al. Land use and land cover influence on water quality in the last free-flowing river draining the western Sierra Nevada, California [J]. *Journal of Hydrology*, 2005, 313(3/4):234-247
- [9] Johns P J. Evaluation and management of the impact of land use change on the nitrogen and phosphorus load delivered to surface waters: The export coefficient modelling approach [J]. *Journal of Hydrology*, 1996, 183(3/4):323-349
- [10] 赵磊. 非点源污染负荷核算方法研究[J]. *环境科学导刊*, 2008, 27(4):9-13
- [11] 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(3):39-39
- [12] 洪小康, 李怀恩. 水质水量相关法在非点源污染负荷估算中的应用[J]. *西安理工大学学报*, 2000, 16(4):384-386
- [13] 蔡明, 李怀恩, 庄咏涛. 估算流域非点源污染负荷的降雨量差值法[J]. *西北农林科技大学学报:自然科学版*, 2005, 33(4):102-106
- [14] 金蕾, 华蕾, 荆红卫, 等. 非点源污染负荷估算方法研究进展及对北京市的应用[J]. *环境污染与防治*, 2010, 32(4):72-77, 83
- [15] Jones P J, Heathwaite A L. Modelling the impact of land use change on water quality in agricultural catchments [J]. *Hydrological Processes*, 1997, 11(3):269-286
- [16] 薛利红, 杨林章. 面源污染物输出系数模型的研究进展[J]. *生态学杂志*, 2009, 28(4):755-761
- [17] 李怀恩, 庄咏涛. 预测非点源营养负荷的输出系数法研究进展与应用[J]. *西安理工大学学报*, 2003, 19(4):307-312
- [18] 李兆富, 杨桂山, 李恒鹏. 西苕溪流域不同土地利用类型营养盐输出系数估算[J]. *水土保持学报*, 2007, 21(1):1-4, 34
- [19] 李恒鹏, 黄文钰, 杨桂山, 等. 太湖地区蠡河流域不同用地类型面源污染特征[J]. *中国环境科学*, 2006, 26(2):243-247
- [20] 蔡明, 李怀恩, 庄咏涛, 等. 改进的输出系数法在流域非点源污染负荷估算中的应用[J]. *水利学报*, 2004(7):40-45
- [21] 丁晓雯, 刘瑞民, 沈珍瑜. 基于水文水质资料的非点源输出系数模型参数确定方法及其应用[J]. *北京师范大学学报*, 2006, 42(5):534-538
- [22] 杨淑静, 张爱平, 杨正礼, 等. 宁夏灌区农业非点源污染负荷估算方法初探[J]. *中国农业科学*, 2009, 42(11):3947-3955
- [23] 刘腊美, 龙天渝, 李崇明, 等. 嘉陵江流域非点源溶解态氮污染负荷模拟研究[J]. *农业环境科学学报*, 2009, 28(4):808-813
- [24] Behrendt H. Inventories of point and diffuse sources and estimated nutrient loads—a comparison for different river basin in central Europe [J]. *Water Science and Technology*, 1996, 33(4/5):99-107
- [25] 国家环境保护总局, 国家质量监督检验检疫总局. GB3838—2002 地表水环境质量标准[S]. 北京:中国标准出版社, 2002
- [26] 王卫平, 洪华生, 张玉珍, 等. 九龙江污染物入海通量初步估算[J]. *海洋环境科学*, 2006, 25(2):45-47, 57
- [27] 樊华, 吉晓燕, 冯明雷, 等. 军山湖流域农业非点源污染氮、磷入湖负荷估算[J]. *环境污染与防治*, 2012, 34(1):91-96
- [28] 山西省第一次全国水利普查领导小组, 山西省水利厅水资源处, 山西省水资源管理中心, 等. 山西省第一次全国水利普查经济社会用水及地表水、地下水水源地普查阶段技术审核方案 [DB/OL]. [2014-2-1] <http://www.doc88.com/p-783442887182.html>
- [29] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 华北地区农村生活污水处理技术指南(试行)[M]. 北京:中国建筑工业出版社, 2010
- [30] Santhi C, Arnold J G, Williams J R, et al. Validation of the SWAT model on a large river basin with point and nonpoint sources [J]. *Journal of the American Water Resources Association*, 2001, 7(5):1169-1188

责任编辑:刘迎春