

# 基于改进输出系数模型的农业源污染物负荷核算

胡晴<sup>1</sup> 郭怀成<sup>1</sup> 王雨琪<sup>1,2</sup> 张杨<sup>1</sup> 李政<sup>1</sup> 付正辉<sup>3</sup> 陆文涛<sup>4,†</sup>

1. 北京大学环境科学与工程学院, 北京 100871; 2. 清华大学附属小学, 北京 100084;

3. 中国环境科学研究院, 北京 100012; 4. 生态环境部环境规划院, 北京 100012;

† 通信作者, E-mail: luwt@caep.org.cn

**摘要** 选择滇池流域作为案例, 考虑区域自然地理、水文气象以及人类活动影响等因素的差异性, 利用1 km×1 km栅格数据, 开展农业源污染物TN和TP入水体系数的精细化模拟测算, 得出降雨驱动因子、地形驱动因子、地表径流因子、地下蓄渗/地下水径流因子和截留因子, 计算得到2016年滇池流域农业源TN和TP的平均综合入水体系数分别为0.447和0.342, 进而估算得到滇池流域2016年全年农业源污染物TN和TP实际入水体负荷量分别为577.39和167.62 t。研究表明, 滇池流域农业源污染物排放量和入水体负荷量存在显著的空间分布差异, 81.0%的氮排放量和74.2%的磷排放量集中分布在草海陆域和外海北岸, 排放量最大的是位于外海的盘龙江上游, 分别占氮、磷总排放量的21.9%和20.2%。此外, 农业源污染物TN和TP排放量中, 来自畜禽养殖的污染占比超过90%, 应作为农业源污染控制的重点关注目标。

**关键词** 农业源; 输出系数; 入水体系数; 负荷量; 滇池

## Estimation of Agricultural Non-point Source Pollution Loads Based on Improved Export Coefficient Model

HU Qing<sup>1</sup>, GUO Huaicheng<sup>1</sup>, WANG Yuqi<sup>1,2</sup>, ZHANG Yang<sup>1</sup>, LI Zheng<sup>1</sup>, FU Zhenghui<sup>3</sup>, LU Wentao<sup>4,†</sup>

1. College of Environmental Science and Engineering, Peking University, Beijing 100871; 2. Tsinghua University Primary School, Beijing 100084; 3. Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012; 4. Academy of Environmental Planning, Beijing 100012; † Corresponding author, E-mail: luwt@caep.org.cn

**Abstract** The Dianchi watershed Basin was selected as a typical watershed. Considering the differences of regional natural geography, hydrometeorology and human activities, using 1 km×1 km grid data, the detailed simulation calculation of the pollutants entering the water source of agricultural sources is carried out. The rainfall driving factors, terrain driving factors, surface runoff factor, underground storage/groundwater runoff factor and interception factor are obtained. The average comprehensive water inflow coefficients of TN and TP from agricultural sources in Dianchi Basin in 2016 are 0.447 and 0.342 respectively, and the actual water inflow loads of TN and TP from agricultural sources in 2016 are 577.39 t and 167.62 t respectively. The results show that the discharge of agricultural source pollutants and the load of influent water have significant spatial variation in Dianchi Lake Basin. 81.0% of nitrogen and 74.2% of phosphorus were concentrated in Caohai land area and the north coast of the open sea. The largest emission was in the upper reaches of Panlong River, with nitrogen and phosphorus accounting for 21.9% and 20.2% respectively. It is also found that livestock and poultry breeding account for more than 90% of the total TN and TP emissions of from agricultural sources, which should be the focus of agricultural source pollution control.

**Key words** agricultural source; export coefficient; inflow coefficient; load; Dianchi watershed

随着流域水环境污染问题日益突出,作为水环境污染成因中面源污染的主要来源,农业污染是造成水体富营养化的主要原因之一,严重地威胁着水体的生态环境<sup>[1-2]</sup>。由于流域的时空变化及面源污染产生和迁移过程中受到自然地理条件的影响,面源污染的过程机制更加复杂,不确定性更大,使得模拟与监测的难度加大<sup>[3-5]</sup>。目前,国内外常用的面源污染负荷计算方法主要有输出系数模型、实证模型和机理模型三类<sup>[6]</sup>。输出系数模型起源于 20 世纪 70 年代<sup>[7]</sup>,1996 年,Johnes<sup>[8]</sup>在总结以往输出系数法研究成果的基础上,综合考虑土地利用类型、牲畜数量和分布、农村居民生活排放和处理水平等不同农业源类型的输出系数,对传统输出系数模型进行改进。该模型因所需参数少、对基础资料要求较低、操作简便和精度较高等特点而得到广泛应用,成为输出系数法的经典模型<sup>[9-12]</sup>。

由于传统的流域输出系数模型没有考虑地下的空间异质性和降雨径流过程等问题,导致模型存在一些局限性。Yuan 等<sup>[13]</sup>引入降雨因子和地形因子,模拟农户生计对面源污染的影响。Cheng 等<sup>[14]</sup>考虑降水和地形因素,发现农村人口的污染物排放是中国北方半干旱区流域面源 TN 污染的重要原因。Wang 等<sup>[15]</sup>加入截留系数来计算三峡库区不同土地利用类型的非点源氮磷污染负荷。庞树江等<sup>[16]</sup>在总氮输出系数模型中引入地表径流因子、土壤水淋溶因子和景观截留因子。龙天渝等<sup>[17]</sup>定义降雨侵蚀力影响系数,并基于地形指数和植被覆盖度,提出入河系数的空间分布式,对三峡库区 2002—2012 年总磷总氮负荷进行模拟,结果表明降雨侵蚀力是影响年际变化的主要因素,畜禽养殖对氮的贡献最大,土地利用对磷的贡献最大。

对输出系数模型的改进,目前考虑最多的是降雨和地形因素,也有部分研究考虑地表径流、地下径流和植被截留等因素<sup>[15-17]</sup>,但很少有研究考虑农业非点源污染物输移的全过程,结合各方面因素来计算综合入水体系数。

本研究在输出系数模型的基础上,考虑区域自然地理、水文气象以及人类活动影响等因素的差异性,建立“驱动因子-传输因子-下渗因子-滞留因子”为主体的全过程入水体系数核算技术体系。针对农业源污染物总氮(TN)和总磷(TP),选择云南省昆明市滇池流域作为典型流域,计算滇池流域 1 km×1 km 栅格的降雨驱动因子、地形驱动因子、地表径流因子、地下蓄渗/地下水径流因子以及截留因子(五因子),进而得到综合入河系数。根据由五因子核算体系得出的综合入水体系数,以区县为单位估算典型流域的农业源污染物入水体负荷量,从而获得较可靠的农业源污染物入水体系数和负荷量计算体系。

## 1 研究区概况

滇池流域(北纬 24°29′—25°28′,东经 102°29′—103°01′)位于中国云南省东部。流域四周为丘陵和山地,东部自北而南分别以嵩明梁王山脉、长虫山、西山和晋宁照壁山为界。地形特点是周边高,中间为滇池盆地。滇池流域面积为 2920 km<sup>2</sup>,沿北偏东方向延伸,东西宽约 47 km,南北长约 109 km。滇池湖面呈弓形,弓背向东,湖岸线长 163 km,湖面东西平均宽 7.5 km,南北长 40 km,最宽处 12.5 km,最窄处不足百米。当水位为正常水位 1887.4 m 时,平均水深 5.3 m,“海眼”最大水深 11.2 m,湖面面积约 309 km<sup>2</sup>,相应的蓄水容积为 15.6 亿 m<sup>3</sup>。滇池具有工农业用水、调蓄、防洪、旅游、航运、水产养殖和调节气候等多种功能,对昆明经济社会的发展和宜人气候的形成起着重要作用<sup>[18-19]</sup>。

## 2 数据与方法

### 2.1 数据来源

雨量数据来源于中国大气同化驱动数据集 CMADS,采用反距离加权插值法<sup>[20]</sup>得到滇池流域基本测算单元 2008—2016 年的降雨量分布(表 1);滇池流域坡度数据提取自 SRTM1 DEM(30 m×30

表 1 滇池流域年均降雨量差值结果  
Table 1 Results of annual average rainfall difference in Dianchi Basin

年份	降雨量/mm	年份	降雨量/mm	年份	降雨量/mm
2016	908.51	2013	759.33	2010	705.24
2015	1073.09	2012	695.47	2009	558.70
2014	874.72	2011	437.20	2008	824.07

m); 土壤数据来自世界土壤数据库(HWSD)土壤数据集(v1.2); 土地利用类型来自中国科学院地理科学与资源研究所 2015 年中国土地利用现状遥感监测数据, 精度为 1 km×1 km; 土壤理化性质数据来自世界土壤数据库(HWSD)土壤数据集; 典型测算单元 2015 年归一化植被指数(NDVI 指数)数据来自中国科学院资源环境科学数据中心; 土地利用类型面积数据来自 GIS; 牲畜数量和农村人口数量来自 2016 年云南省统计年鉴。

## 2.2 改进的输出系数模型

### 2.2.1 改进的输出系数模型

在输出系数法的基础上, 结合综合入水体系数, 以县级行政区为单元, 计算农业污染物入水体负荷量。输出系数法通过将各类污染源(农村生活、畜禽养殖、土地利用)排污量相加, 得到各区县农业非点源排污量, 其中各类农业源的排放量采用输出系数估算。将排放量结合五因子计算得到的各区县 TN 和 TP 的农业污染源入水体系数, 计算得出各区县 TN 和 TP 的污染物入水体负荷。计算公式如下:

$$L = \lambda \sum E_i A_i, \quad (1)$$

式中,  $L$  为非点源污染负荷量(kg/a);  $E_i$  为  $i$  类污染源的输出系数(kg/(km<sup>2</sup>·a)或 kg/(头·a)或 kg/(人·a));  $A_i$  为第  $i$  种土地利用类型面积(km<sup>2</sup>), 或第  $i$  种牲畜数量(头/只), 或农村人口数量(人)。

### 2.2.2 综合入水体系数

不同流域基本测算单元入水体系数  $\lambda$  的大小主要取决于降水、坡度、地表/地下径流传输、流域滞留和河道降解等整个农业污染物产生、迁移和转化的过程及其相关驱动因子。因此, 为确定不同流域入水体系数, 需要综合考虑上述因子的影响, 建立以“降雨因子-坡度因子-地表径流因子-地下蓄渗/径流因子-截留因子”为主体的全过程入水体系数修正方法:

$$\lambda = \alpha \times \beta \times \text{TI} \times \text{LI} \times \text{RI}, \quad (2)$$

式中,  $\alpha$ ,  $\beta$ , TI, LI 和 RI 分别为降雨驱动因子、地形驱动因子、归一化的地表径流因子、归一化的地下蓄渗因子和归一化的截留因子。

#### 1) 降雨驱动因子。

降雨量对氮、磷流失量有较显著的影响, 降雨径流对土壤下界面的冲刷作用导致的非点源污染是降雨对输出系数产生影响的主要原因<sup>[9,11]</sup>。降雨量

和降雨强度是影响流域非点源污染物输出量大小的两个主要因素, 并且降雨量和降雨强度与降雨径流量之间具有较好的相关关系<sup>[21]</sup>。

通过对典型流域基本测算单元内的大量监测数据进行回归分析, 建立流域全区年平均降雨量与农业面源污染物年入水体量的相关关系, 得到典型流域网格单元的降雨驱动因子, 计算公式如下:

$$\alpha = \alpha_t \times \alpha_s = \frac{L}{\bar{L}} \times \frac{R_j}{\bar{R}} = \frac{f(r)}{f(\bar{r})} \times \frac{R_j}{\bar{R}}, \quad (3)$$

式中,  $\alpha$  为降雨影响因子, 由时间不均匀性影响因子  $\alpha_t$  和空间不均匀性影响因子  $\alpha_s$  两方面的叠加作用决定;  $\alpha_t$  为降雨年际差异驱动因子;  $\alpha_s$  为降雨空间分布驱动因子;  $L$  为农业面源污染物年入水体量;  $\bar{L}$  为农业面源污染物年均入水体量;  $R_j$  为流域基本单元空间单元  $j$  的年均降雨量;  $\bar{R}$  为流域全区年均降雨量;  $r$  为流域全区年降雨量;  $\bar{r}$  为流域全区年均降雨量;  $f(r)$  为农业面源污染物年入水体量。

依据长江流域上游降雨量和农业污染物负荷量数据<sup>[12]</sup>, 建立流域全区年平均降水量  $r$  与农业面源污染物(TN 和 TP)年入水体量的相关关系。

年降雨量与 TN 的回归关系式:

$$L_{\text{TN}} = 7.7059r^2 - 11293.0034r + 4413676.3918 \\ (R^2 = 0.09762); \quad (4)$$

年降雨量与 TP 关系式:

$$L_{\text{TP}} = 0.0267r^2 - 25.6048r + 10863.8251 \\ (R^2 = 0.7347); \quad (5)$$

其中,  $r$  为年平均降雨量(mm),  $L$  为农业面源入河量(kg)。因此, 可以得到如下典型流域降雨驱动因子计算式。

TN 降雨驱动因子:

$$\alpha_{\text{TN}} = \frac{7.7059r^2 - 11293.0034r + 4413676.3918}{7.7059\bar{r}^2 - 11293.0034\bar{r} + 4413676.3918} \times \frac{R_j}{\bar{R}}, \quad (6)$$

TP 降雨驱动因子:

$$\alpha_{\text{TP}} = \frac{0.0267r^2 - 25.6048r + 10863.8251}{0.0267\bar{r}^2 - 25.6048\bar{r} + 10863.8251} \times \frac{R_j}{\bar{R}}, \quad (7)$$

首先获取降雨年际变化因子, 然后将流域年降雨量与 GIS 相结合, 获取降雨的空间驱动因子, 进而得到降雨驱动因子的空间分布图(图 1)。其中, 2016 年降雨对 TN 和 TP 负荷量的驱动因子取值范围分别为 0.976~3.493(均值 1.861)和 1.006~1.927(均

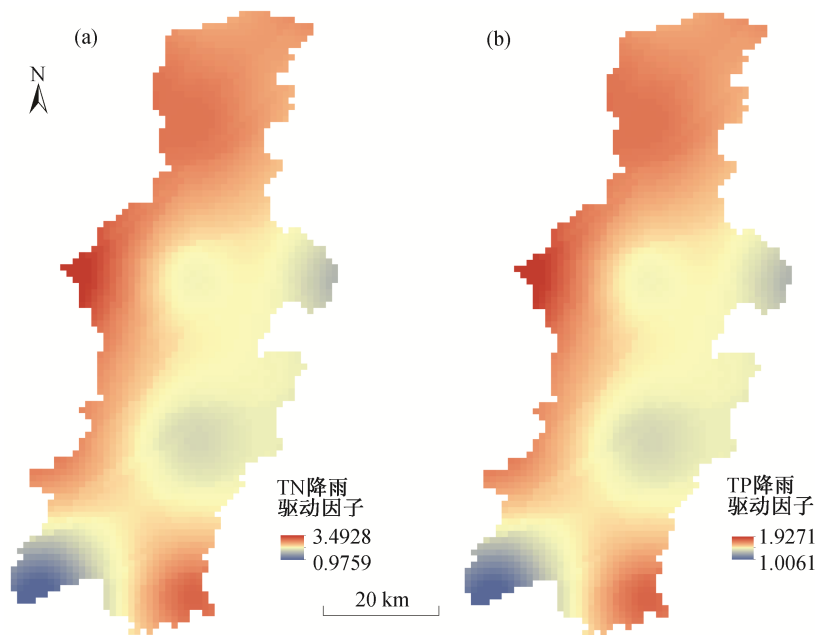


图 1 滇池流域基本测算单元 TN 和 TP 降雨驱动因子计算结果

Fig. 1 Calculation results of TN and TP rainfall driving factors for basic calculation units of Dianchi Basin

值 1.429)。空间分布上, TN 和 TP 负荷量的驱动因子与降雨量的变化一致, 都表现为西北部 and 东南部较高, 西南部较低。

## 2) 地形驱动因子。

地形影响因子 $\beta$ <sup>[22]</sup>可以定义为

$$\beta = \frac{L(\theta_j)}{L(\bar{\theta})} = \frac{c\theta_j^d}{c\bar{\theta}^d} = \frac{\theta_j^d}{\bar{\theta}^d}, \quad (8)$$

其中,  $\theta_j$  为流域空间单元的坡度,  $L$  为农业面源污染物年入水体量,  $\bar{\theta}$  为典型流域基本测算单元的平均坡度,  $c$  和  $d$  为常量。

地形影响因子用来描述地形异质性对非点源污染负荷的影响。坡度是影响坡面污染物产生的重要因素, 主要通过影响径流量来影响其携带的营养物质的流失量。因此, 坡度对农业源污染物的影响可转化为坡度与径流量的关系。已有研究证实, 坡度与坡面径流量呈正相关关系<sup>[23-24]</sup>, 径流量可以表示为坡度的幂函数与常量的乘积。

滇池流域平均坡度为  $9.88^\circ$ , 其分布特征表现为四周高, 中间区域逐步发展为平原, 根据已有研究, 取  $d$  值为  $0.61$ <sup>[10,25]</sup>。计算得到每个网格的地形驱动因子 $\beta$ 值(图 2), 取值范围为  $0 \sim 1.833$ , 分布与地形相吻合。

## 3) 地表径流因子。

降雨与径流的关系式为



图 2 滇池流域地形驱动因子

Fig. 2 Terrain driving factors of Dianchi Basin

$$\frac{F}{S} = \frac{Q}{(P - I_a)}, \quad (9)$$

式中,  $F$  为径流开始时的实际蓄水量(mm),  $S$  为流域最大蓄水量(mm),  $Q$  为一次降雨实际产生的地表径流量(mm),  $P$  为总降雨量(mm),  $I_a$  是地表径流开始前的降雨初损量(mm)。

本研究采用SCS-CN产流模型<sup>[26]</sup>对滇池流域内的地表径流因子进行计算:

$$Q = \begin{cases} \frac{(P-I_a)^2}{(P-I_a)+S}, & P > I_a, \\ 0, & P \leq I_a, \end{cases} \quad (10)$$

式中,  $P$ 为变量, 一般由研究区域实地监测数据获得;  $S$ 为参数, 与下垫面因素有关。为了计算 $S$ , 引入参数-径流曲线数(curve number, CN),  $S$ 与CN的关系式为

$$S = \frac{25400}{CN} - 254, \quad (11)$$

其中, CN是一个无量纲参数, 综合反映流域下垫面特征, 数值范围在1~100之间, 其值越大表明蓄水能力越小。

滇池流域NDVI指数介于0.67~0.73之间, 加上草地允许放牧, 植被属于中度覆盖水平, 故参照《SWAT 2009》<sup>[27]</sup>中SCS曲线数的中度水平; 又因为云南水田种植多处于平坦港湾且分布有梯田, 故拟定不同土地类型、不同土壤类型对应的CN<sub>2</sub>(表2)。

根据土壤数据中GRAVEL, SAND, CLAY及有机质参数, 借助SPAW软件求得饱和和水利传导系数, 据此进行水文分组, 找到对应的土壤类型。查表2可得不同土地利用类型和土壤类型的CN<sub>2</sub>值, 根据以下公式计算坡度调整下的CN<sub>2s</sub>(即CN值):

$$CN_3 = CN_2 \times \exp[0.00673 \times (100 - CN_2)], \quad (12)$$

$$CN_{2s} = \frac{CN_3 - CN_2}{3} [1 - 2\exp(-13.86 \text{ slp})] + CN_2. \quad (13)$$

其中, slp为子流域平均坡度(m/m)。

滇池流域基本测算单元的地表径流因子计算结果在[427.39, 996.92]范围内, 均值为762.88。

表2 不同土地类型、不同土壤类型所对应的CN<sub>2</sub>值  
Table 2 CN<sub>2</sub> values corresponding to different land types and soil types

土地利用	土壤类型			
	A	B	C	D
耕地 0	59	70	78	81
林地 1	36	60	73	79
草地 2	76	85	90	93
水域 3	100	100	100	100
建筑用地 4	59	74	82	86

对于大部分地区, 由水土流失造成的磷流失量都以土壤侵蚀为载体<sup>[28]</sup>, 故采用Wischmeier等<sup>[29]</sup>提出的通用土壤流失方程(USLE)评估典型流域基本测算单元的土壤侵蚀风险:

$$A = R \times K \times L \times S \times C \times P, \quad (14)$$

式中,  $A$ 为土壤年侵蚀量(t/(hm<sup>2</sup>·a)),  $R$ 为降雨侵蚀力因子((MJ·mm)/(hm<sup>2</sup>·h)),  $K$ 为土壤可蚀因子((t·hm<sup>2</sup>·h)/(MJ·mm·hm<sup>2</sup>)),  $L$ 为坡长因子(无量纲),  $S$ 为坡度因子(无量纲),  $C$ 为植被覆盖与管理因子(无量纲),  $P$ 为水土保持措施因子(无量纲)。滇池流域基本测算单元的土壤侵蚀因子栅格计算结果如图3所示。

#### 4) 地下蓄渗/地下水径流因子。

污染物在迁移过程中, 地下蓄渗/地下水径流是农业面源污染物流失的一个重要途径, 因此引入地下蓄渗/地下水径流因子。本文中地下蓄渗/地下水径流因子只考虑土壤水分下渗对污染物流失的影响, 通过土壤水分的下渗能力与污染物负荷强度的乘积, 近似地描述污染物的实际下渗量。常用的有地下蓄渗/地下水径流因子(LI)<sup>[16]</sup>, 可以通过土壤类型、土地利用和前期土壤水分状况确定水文土壤组。通过降雨量空间分布指数(PI)和季节分配指数(SI)(其中PI指数表征流域单元可用于下渗的最大理论降雨量(mm), SI表征因降雨量季节变化对土壤水分下渗的影响(无量纲)), 确定流域土壤水分实际下渗能力, 即确定土壤水淋溶因子LI, 计算公式如下:

$$LI = PI \cdot SI$$

$$= \frac{\text{prec} - 0.4 \left( \frac{25400}{CN} - 254 \right)}{\text{prec} + 0.6 \left( \frac{25400}{CN} - 254 \right)} \times \sqrt[3]{2 \times \frac{\text{prec}(\text{ls})}{\text{prec}}}, \quad (15)$$

其中, Prec和prec(ls)分别为年降雨量(mm/a)和非汛期(11月—次年5月)总降雨量(mm)。

利用CMADS数据集进行降雨量差值插值, 得到2008—2016年每年降雨量及非汛期降雨量, 滇池流域基本测算单元2016年的年均降雨量为910.68 mm, 非汛期年均降雨量为243.61 mm。网格单元地下蓄渗径流因子(LI)栅格计算结果如图4所示, 其数值范围为309.503~863.808。

#### 5) 截留因子。

已有研究表明, 截留带宽度越大, 坡度越小, 截留效率越高; 植被类型为林地或草地时对截留效

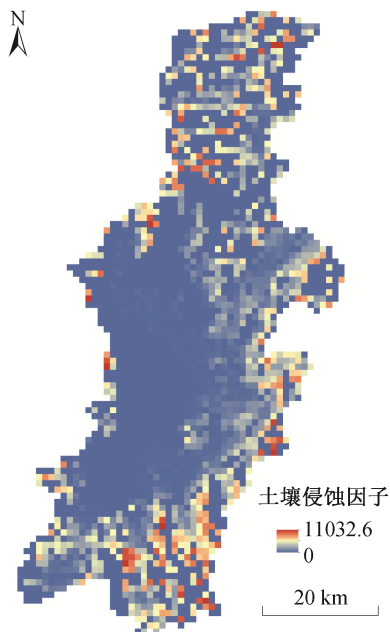


图 3 滇池流域土壤侵蚀因子栅格计算结果  
Fig. 3 Grid calculation results of soil erosion factors in Dianchi basin

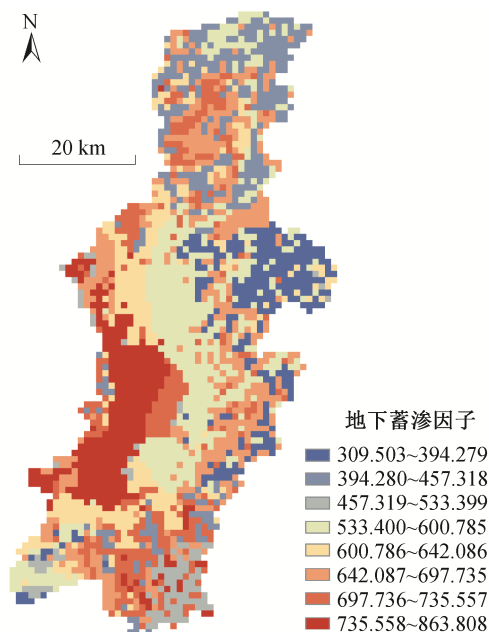


图 4 地下蓄渗径流因子计算结果  
Fig. 4 Calculation results of runoff factor of underground seepage storage

率的影响不显著<sup>[30]</sup>。构造截留因子(RI)<sup>[16]</sup>, 表示流域上某一点的污染物向水体传输过程中被植被缓冲带截留的可能性, 计算公式如下:

$$RI = \ln \left( \frac{\sum_{DA=1}^N T_{DAi}}{\tan B_{DAi}} \right), \quad (16)$$

式中, DA 表示植被类型,  $\sum T_{DAi}$  是为林草地累积截留效率,  $B_{DAi}$  为平均坡度。

考虑林地和草地对农业源污染物的截留作用, 利用土地利用类型数据和 DEM 数据在 ArcGIS 平台下计算截留因子。对于 TN 截留因子和 TP 截留因子, 土地利用类型为林地或草地的栅格按表 3 赋值, 表示林草地的拦截效率; 其他土地利用类型的栅格值设为 0, 即得植被截留带的二值图。以植被截留带二值图与  $\frac{1}{\tan B_{DAi}}$  的乘积为权重栅格, 进行 Flow

Length 运算, 将计算结果取对数得到 RI 值。

计算得到滇池流域基本测算单元林草地 TN 和 TP 截流因子分别在 [1.48, 7.02] 和 [1.59, 7.15] 区间范围内。

表 3 林草地对 TN 和 TP 的截留效率

Table 3 Interception efficiency of forest and grassland to TN and TP

土地利用类型	TN	TP
林地	0.83	0.75
草地	0.79	0.70

### 3 结果与分析

#### 3.1 综合入水体系数

滇池流域基本测算单元涉及各区县的农业污染物排放量基于面积加权法得到, 各区县污染物入水体系数由滇池流域综合入水体系数栅格数据取平均值得到(图 5), TN 综合入水体系数平均值为 0.447, TP 综合入水体系数平均值为 0.342。农业污染物入水系数在滇池流域的分布特点表现为四周高, 中部滇池盆地低, 西部最高。综合入水体系数越高, 表明该网格地区农业源污染物排放后进入水体, 造成水环境污染的风险越高。

#### 3.2 农业源污染物入水体负荷核算

采用改进输出系数法, 计算滇池流域各区县种植业、畜禽养殖业和农村分散生活排放的 TN 和 TP 污染物入水体负荷(基准年为 2016 年)。农村生活、畜禽养殖和土地利用方面的非点源排污系数参考《第一次全国污染源普查》和文献[22,31-33](表 4)。计算数据和结果见表 5, 滇池流域基本测算单元农业源 TN 和 TP 入河负荷量分别为 577395.73 kg 和 167616.68 kg。

滇池流域基本测算单元农业源 TN 和 TP 排放量与入水体负荷量分布见图 6, 可以看出滇池流域各

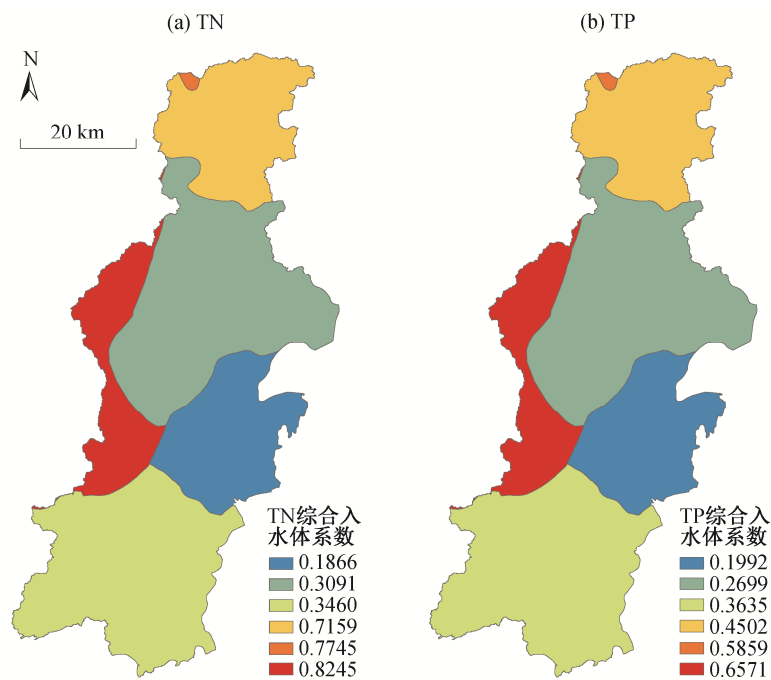


图 5 滇池流域各区县 TN 和 TP 综合入水体系数

Fig. 5 TN and TP comprehensive inflow coefficient of each district and county in Dianchi Basin

表 4 农业源污染物输出系数

Table 4 Agricultural source pollutants export coefficients

类别	污染源	总氮排污系数	总磷排污系数	单位
土地利用	耕地	2.32	0.161	kg/(km <sup>2</sup> ·a)
	林地	0.25	0.015	
	草地	0.6	0.020	
	建设用地	1.3	0.050	
	未利用地	1.34	0.051	
禽畜养殖	牛	16.226	0.587	kg/(头·a)
	羊	0.4	0.054	
	猪	0.74	0.443	
	鸡	0.046	0.005	
农村生活	人口	0.15	0.08	kg/(人·a)

表 5 滇池流域基本测算单元农业源污染物入河负荷量计算

Table 5 Load calculation of agricultural source pollutants into Dianchi Basin basic calculation unit

代码	名称	区县流域内 TN 排放量/kg	区县流域内 TP 排放量/kg	TN 入水 系数	TP 入水 系数	TN 入河 负荷量/kg	TP 入河 负荷量/kg
530124	富民县	2217.41	744.37	0.72	0.51	1587.58	379.86
530127	嵩明县	196906.70	54330.33	0.46	0.40	91117.11	21547.36
530101	昆明市市辖区	269815.43	96708.75	0.77	0.59	208974.20	57228.79
530101	昆明市市辖区	523643.32	187626.11	0.31	0.27	161867.98	50963.96
530121	呈贡县	34381.02	12711.61	0.19	0.20	6417.29	2543.02
530122	晋宁县	310416.39	96249.01	0.35	0.36	107421.58	34953.70
滇池流域基本测算单元农业源污染物入河负荷量						577395.73	167616.68

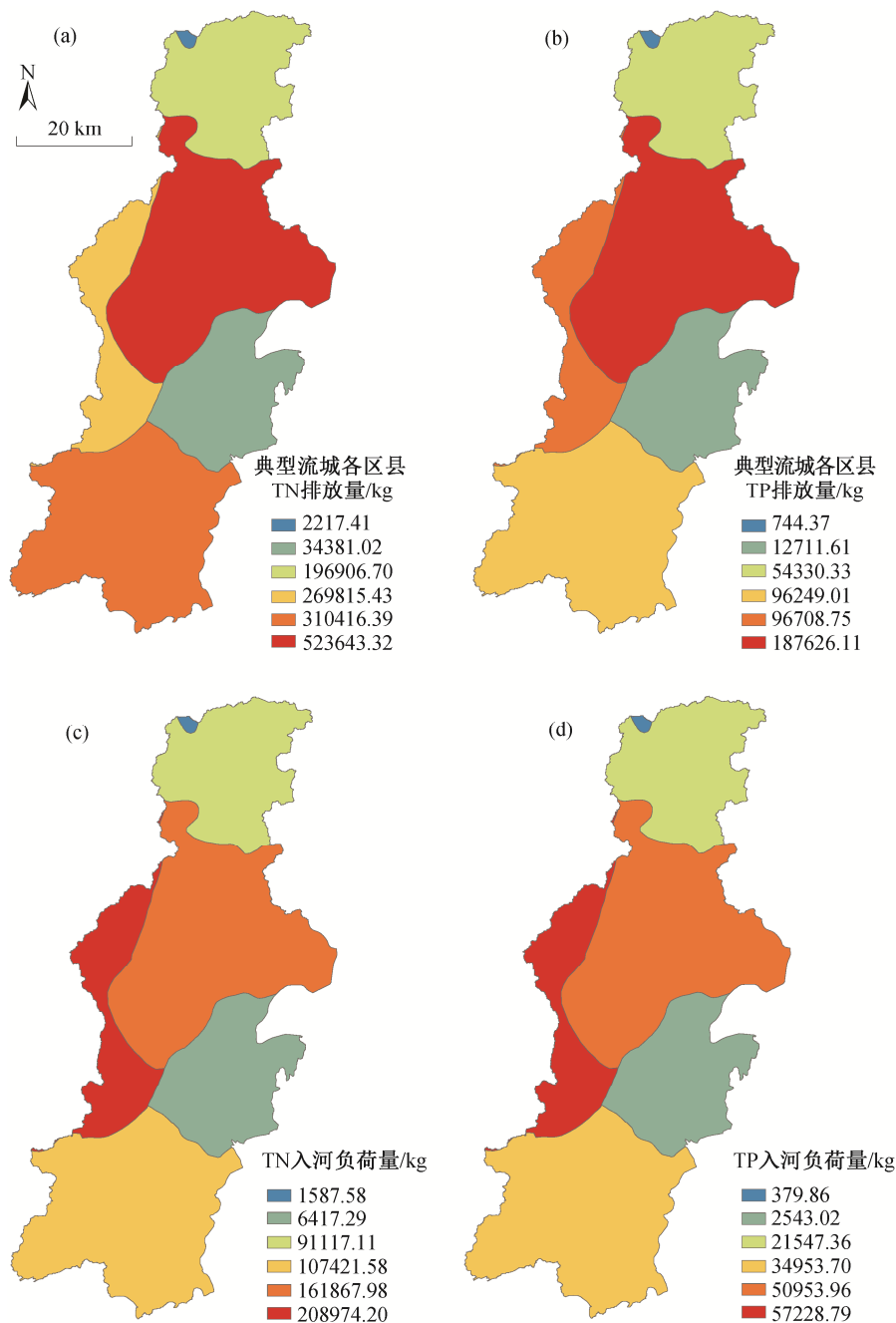


图 6 滇池流域基本测算单元农业源 TN 和 TP 排放量与入水体负荷量分布

Fig. 6 Distribution of TN and TP emissions from agricultural sources and water load in the basic calculation unit of Dianchi Basin

区县的农业源污染物排放量和入水体负荷量分布存在一定的差异。环滇池的昆明市区, 由于人口密集、畜禽养殖量大, 是农业源污染物排放量和入湖量最大的地区, 并且西部山地区域由于地形坡度大, 冲刷效应明显, 入河系数大, 导致该区域非点源污染物入湖量最大。

农业源污染物入湖量最大的是昆明市区和晋宁县, 在滇池流域, 北部平坦的湖盆地和台地已被建

成昆明的主城区, 东部地势平缓的湖盆地成为已建或规划待建的东市区, 西部地势陡峭, 几乎没有太大的利用空间。随着呈贡新城区的建设和发展, 南部的晋宁所拥有的山地、半山地和湖盆地成为未来农业发展的中心地带, 也成为未来农村面源污染产生的关键地区和主要策源地。在气候和区位优异的条件下, 晋宁县目前拥有大规模的蔬菜和花卉种植区, 化肥和农药的使用量也随之呈现剧烈上升的趋



势。同时,晋宁县的大河水库和柴河水库均属滇池流域多年调节中型水库,是昆明城市集中饮用水源地之一,兼顾农田灌溉和防洪,因此该区域的农业面源污染对流经地区和下游的居民生活和健康有重要影响,也是滇池富营养化问题的源头之一。因此,对滇池流域农业源污染物的控制要特别关注昆明市区和晋宁县这两个地区。

## 4 结论

本文通过五因子计算,得到滇池流域基本测算单元平均TN和TP综合入水体系数分别为0.447和0.342,农业源污染物入水体系数在空间分布上表现为四周高,中部滇池盆地低,西部最高。

基于综合入水体系数,采用改进输出系数法,估算出滇池流域农业源(种植业、畜禽养殖业和农村分散生活)污染物TN和TP入水体负荷量分别为577.39 t和167.62 t。研究结果揭示,农业源污染物排放量和入水体负荷量在典型流域的分布存在一定的差异,表明农业源污染物实际入河量并不等同于排放量。

入河系数能够表征地形、地貌和地表状况对污染物的截留作用,根据负荷的空间分布,可以针对负荷较大的区域进行优先治理。非点源污染物入湖量最大的昆明市区和晋宁县是滇池流域农业源污染物控制过程中要特别关注的两个地区。

## 参考文献

- [1] 周芳,金书秦,张惠. 西藏农业面源TN、TP排放的空间差异与分布特征. 中国农业资源与区划, 2019, 40(1): 35-41
- [2] 刘鑫,史斌,孟晶,等. 白洋淀水体富营养化和沉积物污染时空变化特征. 环境科学, 2020, 41(5): 2127-2136
- [3] 刘全葐,齐明亮,马啸宙,等. 基于遥感和GIS的洮河流域面源污染流域尺度模拟及防治对策研究. 干旱区地理, 2020, 43(3): 706-714
- [4] 李娜,韩维崢,沈梦楠,等. 基于输出系数模型的水库汇水区农业面源污染负荷估算. 农业工程学报, 2016, 32(8): 224-230
- [5] 李兆富,杨桂山,李恒鹏. 基于改进输出系数模型的流域营养盐输出估算. 环境科学, 2009, 30(3): 668-672
- [6] 刘庄,晁建颖,张丽,等. 中国非点源污染负荷计算研究现状与存在问题. 水科学进展, 2015, 26(3): 432-442
- [7] Uttormark P D, Chapin J D, Green K M. Estimating nutrient loading of lakes from non-point sources [R]. New York: EPA, 1974
- [8] Johnes 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. Journal of Hydrology, 1996, 183(3/4): 323-349
- [9] 胡正,敖天其,李孟芮,等. 改进的输出系数模型在缺资料地区面源综合评价. 灌溉排水学报, 2019, 38(2): 108-114
- [10] Ding Xiaowen. The simulation research on agricultural non-point source pollution in Yongding River in Hebei Province. Procedia Environmental Sciences, 2010, 2: 1770-1774
- [11] 徐立红,陈成广,胡保卫,等. 基于流域降雨强度的氮磷输出系数模型改进及应用. 农业工程学报, 2015, 31(16): 159-166
- [12] Zhang L G, Wang Z Q, Chai J, et al. Temporal and spatial changes of non-point source N and P and its decoupling from agricultural development in water source area of middle route of the South-to-North Water Diversion Project. Sustainability, 2019, 11(3): 895
- [13] Yuan C C, Liu L M, Ye J W, et al. Assessing the effects of rural livelihood transition on non-point source pollution: a coupled ABM-IECM model. Environmental Science and Pollution Research, 2017, 24: 12899-12917
- [14] Cheng X, Chen L D, Sun R H, et al. An improved export coefficient model to estimate non-point source phosphorus pollution risks under complex precipitation and terrain conditions. Environmental Science and Pollution Research, 2018, 25: 20946-20955
- [15] Wang J L, Shao J A, Wang D, et al. Simulation of the dissolved nitrogen and phosphorus loads in different land uses in the Three Gorges Reservoir Region-based on the improved export coefficient model. Environmental Science—Processes & Impacts, 2015, 17(11): 1976-1989
- [16] 庞树江,王晓燕. 流域尺度非点源总氮输出系数改进模型的应用. 农业工程学报, 2017, 33(18): 213-223
- [17] 龙天渝,刘敏,刘佳. 三峡库区非点源污染负荷时

- 空分布模型的构建及应用. 农业工程学报, 2016, 32(8): 217–223
- [18] 苏斌, 史正涛, 叶燎原, 等. 宝象河雨季径流过程氮素输移特征及来源示踪. 环境化学, 2019, 38(3): 686–696
- [19] 东阳. 降雨和土地利用对流域非点源污染的影响——以滇池流域为例. 人民长江, 2018, 49(14): 24–33
- [20] 张苏. 土壤重金属的空间插值方法比较分析——以阳谷县为例. 测绘与空间地理信息, 2020, 43(4): 148–153
- [21] 陈正维, 刘兴, 年朱波. 基于 SCS-CN 模型的紫色土坡地径流预测. 农业工程学报, 2014, 30(7): 72–81
- [22] 任玮, 代超, 郭怀成. 基于改进输出系数模型的云南宝象河流域非点源污染负荷估算. 中国环境科学, 2015, 35(8): 2400–2408
- [23] Liu Q Q, Singh V P. Effect of microtopography, slope length and gradient, and vegetative cover on overland flow through simulation. *Journal of Hydrologic Engineering*, 2004, 9(5): 375–382
- [24] Aschmann S G, Anderson D P, Croft R J, et al. Using a watershed nutrient dynamics model, WEND, to address watershed-scale nutrient management challenges. *Journal of Soil & Water Conservation*, 1999, 54(4): 630–635
- [25] 程先, 陈利顶, 孙然好. 考虑降水和地形的京津冀水库流域非点源污染负荷估算. 农业工程学报, 2017, 33(4): 265–272
- [26] Auerswald K, Haider J. Runoff curve numbers for small grain under German cropping conditions. *Journal of Environmental Management*, 1996, 47(47): 223–228
- [27] Neitsch S L, Arnold J G, Kiniry J R, 等. SWAT 2009 理论基础. 龙爱华, 邹松兵, 许宝荣, 等译. 郑州: 黄河水利出版社, 2012
- [28] 梁晓珍, 符素华, 丁琳. 地形因子计算方法对土壤侵蚀评价的影响. 水土保持学报, 2019, 33(6): 21–26
- [29] Wischmeier W H, Johnson C B, Cross B V. Soil erodibility nomograph for farmland and construction sites. *Journal of Soil & Water Conservation*, 1971, 26(5): 189–193
- [30] 李思思, 张亮, 杜耘, 等. 面源磷负荷改进输出系数模型及其应用. 长江流域资源与环境, 2014, 23(9): 1330–1336
- [31] Soranno P A, Hubler S L, Carpenter S R, et al. Phosphorus loads to surface waters: a simple model to account for spatial pattern of land use. *Ecological Applications*, 1996, 6(3): 865–878
- [32] Ma X, Li Y, Zhang M, et al. Assessment and analysis of non-point source nitrogen and phosphorus loads in the Three Gorges Reservoir Area of Hubei Province, China. *Science of the Total Environment*, 2011, 412–413: 154–161
- [33] 韦晓雪, 李晓琳, 郑毅. 基于输出系数模型的 1998—2016 年洱海流域磷素时空变化特征分析. 农业环境科学学报, 2020, 39(1): 171–181