

基于流域降雨强度的氮磷输出系数模型改进及应用

徐立红¹, 陈成广², 胡保卫^{3*}, 邢波¹, 叶潞洁¹

(1. 绍兴市环境监测中心站, 绍兴 312000; 2. 绍兴文理学院元培学院生命科学系, 绍兴 312000;

3. 绍兴文理学院, 绍兴 312000)

摘要: 为研究曹娥江流域农业非点源氮磷输出负荷量, 将流域降雨及不同营养源产生的氮磷“合成”考虑, 提出了产污系数以表征降雨产汇流过程氮磷输出强度, 改进了输出系数模型, 并探索发现流域年降雨强度与氮磷产污系数之间呈指数正相关, 由此构建了基于年降雨强度的农业非点源氮磷输出负荷模型。利用此模型估算了农业污染源氮磷输出负荷量, 显示 2005—2010 年流域总氮 (total nitrogen, TN) 年输出总量为 5456.60~12268.38 t, 总磷 (total phosphorus, TP) 为 393.19~820.65 t, 年度分布不均, 降雨对 TN 输出总量的贡献率高达 54.75%~69.67%。不同农业污染源对 TN、TP 输出总量的贡献率表明, 该流域农业非点源氮磷输出负荷主要来源于人畜, 应加强农村生活污水及垃圾、畜禽养殖粪便等治理, 进一步控制农田过量施肥, 减少耕地氮磷流失。

关键词: 模型; 氮; 磷; 输出系数模型; 年降雨强度; 曹娥江流域; 产污系数;

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2015.16.022

中图分类号: X524

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2015)-16-0159-08

徐立红, 陈成广, 胡保卫, 邢波, 叶潞洁. 基于流域降雨强度的氮磷输出系数模型改进及应用[J]. 农业工程学报, 2015, 31(16): 159—166. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2015.16.022 http://www.tcsae.org

Xu Lihong, Chen Chengguang, Hu Baowei, Xing Bo, Ye Lujie. Improvement of export coefficient model for N and P based on rainfall intensity and its application[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2015, 31(16): 159—166. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2015.16.022 http://www.tcsae.org

0 引言

应用数学模型是目前农业非点源污染输出负荷估算的重要手段, 国内外学者已建立了多种农业非点源污染负荷估算模型^[1-4]。其中, 输出系数模型因其对基础资料要求少、建模费用低、操作简便, 且能保证一定的精度^[5], 而被广泛地应用^[6-10]。但是, 早期的输出系数模型在应用中存在较多不足, 如未按作物种类细分农业用地类型, 假定所有土地利用类型的输出系数固定不变, 污染物输出量与土地面积呈线性关系等^[11], 并且也未涉及降雨、径流与地形等对污染输出的影响。因此, 许多学者对输出系数模型进行了改进。龙天渝等^[12]在输出系数模型中引入了污染负荷系数, 用以表征降雨与产流等水文因素, 并预测计算和分析了输入三峡库区的氮磷面源污染负荷; 丁晓雯等^[13]也在原有模型的基础上考虑降雨和地形对非点源污染的影响, 将改进后的输出系数模型应用于长江上游流域的总氮负荷估算, 模拟结果更加接近监测值。通过地形和降水校正因子改进后的模型, 直观地阐明了地形、降水因子与非点源污染物含量间的定量关系^[14]。当然, 模型改进也存在一些不完善之处,

如很少考虑降雨强度对污染输出的影响, 而且往往忽略了降雨对流域各营养源和雨水携带的污染物输出的共同驱动作用。

本研究拟将流域不同营养源与降雨携带的氮磷产生量“合成”考虑, 探索年降雨强度等气象因素对曹娥江流域氮磷输出负荷强弱程度的影响, 对现有输出系数模型进行改进, 并应用于流域农业污染源氮磷输出负荷的估算, 以期为该流域的农业非点源污染调控研究提供定量化依据。

1 研究流域概况

曹娥江是浙江省第三大河, 发源于金华市磐安县尖公岭, 自南而北流经新昌、嵊州、上虞, 于绍兴县三江口以下注入杭州湾 (见图 1)。主流全长 197 km, 流域总面积 6 046 km², 其中绍兴境内面积 5 169 km², 占全市总面积的 62.6%。流域地处亚热带季风气候区, 多年平均降水量约 1 065 mm, 时空分布不均。地势南高北低, 四周高中部低, 受山脉河流盘亘、切割和地质构造运动影响, 地貌分中山、低山、丘陵、河谷平原等类型。土壤类型多样, 分布复杂, 域内中山和低山地区以黄壤为主, 红壤次之; 丘陵地区以红壤、岩性土为主; 中部的河谷平原地区大部分为水稻土和潮土, 耕作性能和灌溉条件较佳, 是域内粮食和经济作物主要产区, 但其土壤中磷、钾营养元素缺乏, 农田种植大量施用肥料, 受降雨 (灌溉) 径流作用流失, 导致了农业非点源污染^[15-16]。

收稿日期: 2015-06-12 修订日期: 2015-07-30

基金项目: 浙江省科技厅公益技术研究社会发展项目 (2010C33101); 绍兴市科技计划项目 (2014B70049)。

作者简介: 徐立红, 女, 浙江绍兴人, 高级工程师, 主要从事环境污染监测。绍兴 绍兴市环境监测中心站, 312000。Email: xlh127@126.com

*通信作者: 胡保卫, 男, 浙江绍兴人, 教授, 博士, 主要从事水污染控制研究。绍兴 绍兴文理学院, 312000。Email: hbw@zscas.edu.cn

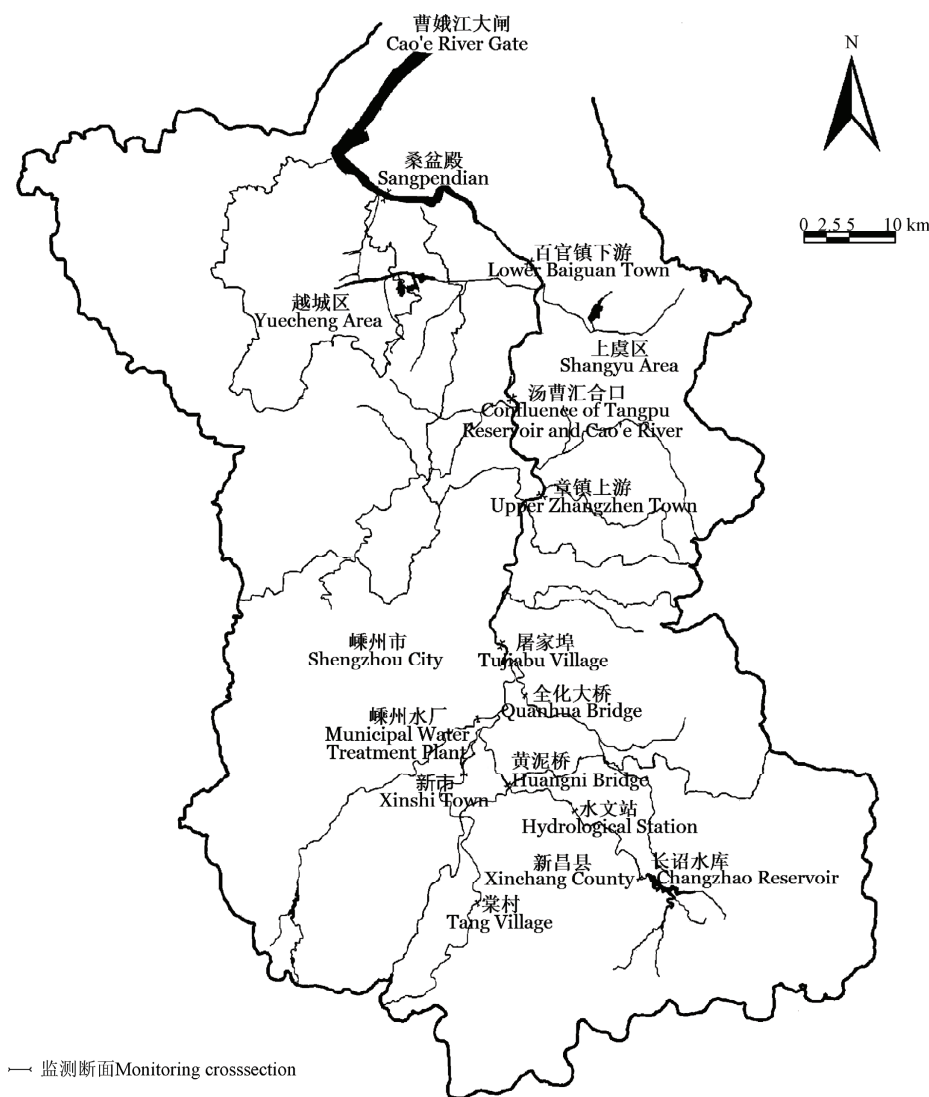


图 1 曹娥江水系区位图
Fig.1 Location diagram of Cao'e river system

2 输出系数模型改进

2.1 Johnes 模型简介

早期的输出系数模型主要用于评价土地利用和湖泊富营养化之间的关系,其假定所有土地利用类型的输出系数相同^[17],但这与现实情况相差较大,因而许多学者对其进行了改进和发展。1996 年,Johnes 等^[5]在输出系数模型中加入了牲畜、人口等因素的影响,针对不同作物类型的耕地、不同种类牲畜的数量和分布以及居民生活污水的排放和处理状况分别采用了不同的输出系数,并在总氮输入方面考虑了植物固氮、空气沉降等因素,进一步丰富了输出系数模型的内容。其模型的一般表达式为:

$$L_j = \sum_{i=1}^m E_{ij} A_i + P \quad (1)$$

式中: i 为土地利用类型; j 为污染物类型; m 为流域中土地利用类型的种类或牲畜、人口; L_j 为流域 j 种污染物的总负荷量, kg/a ; E_{ij} 为污染物 j 在流域第 i 类土地利用类型中的输出系数, $\text{kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ 或第 i 种牲畜每头 (只)

的排泄系数, $\text{kg}/(\text{只} \cdot \text{a})$ 或人口每人的输出系数, $\text{kg}/(\text{人} \cdot \text{a})$; A_i 为第 i 类土地利用类型的面积, hm^2 或第 i 种牲畜数量, 只或人口数量, 人; P 为降雨输出的污染物总量, kg/a 。

其中, 降雨输出的污染物总量 P 可表示为:

$$P = c \cdot r \cdot \alpha \quad (2)$$

式中: c 为雨水中营养物浓度, kg/m^3 ; r 为年降雨总量, m^3/a ; α 为径流系数。

2.2 模型改进的机理

通常, 流域各种污染源产生的污染物会先聚合雨水携带的污染物, 然后在降雨的驱动下一起随所形成的径流迁移。因此, 笔者从流域农业非点源污染形成的实际出发, 将各种污染源产生的污染物与雨水携带的污染物“合成”考虑:

$$M = \sum_{i=1}^m E_{ij} A_i + c \cdot r \quad (3)$$

式中: M 为流域污染物总产生量, kg/a ; 其他参数同前式 (1)、(2)。

Johnes 模型虽然细化了不同土地利用类型、营养源

数量及雨水自身携带的污染物等与流域非点源污染输出的关系，但忽略了降雨产流对各种类型土地和营养源污染输出的影响，也未考虑污染物随径流迁移过程中出现的土壤和植被截留、向地下水渗透、生化反应、泥沙吸附、河流降解等各种损失。并且，农业非点源污染形成的实际过程过于复杂，存在降雨随机性、强度不均匀性以及污染物随径流迁移转化途径不明确性等问题^[18]。因此，为了方便统计分析，本文参照黑箱理论，采用流域产污系数 δ 来表示降雨产汇流过程中农业非点源污染的输出强度，以反映降雨产流及污染物迁移过程各种损失作用对污染输出的共同影响。

综合以上，在降雨驱动下，流域出口处农业非点源污染输出负荷 L'_j 可以表述为：

$$L'_j = \delta \cdot M$$

(4)

2.3 模型参数的确定

2.3.1 基础数据获取及处理

由于曹娥江流域绍兴境内面积占很大比例，并考虑到研究的可行性和资料的局限性，本文研究的曹娥江流域仅指绍兴境内部分，行政区域包括绍兴市区、柯桥区、上虞区、嵊州市和新昌县。将流域农业污染源分为农业活动污染、畜禽粪便污染和农村生活污染等 3 类，通过绍兴市 2005—2010 年统计年鉴资料，查得流域各县市的土地利用情况及畜禽养殖、农村人口数量，然后累加得到曹娥江流域 2005—2010 年的基础数据资料，具体结果见表 1。

2.3.2 输出系数值的确定

影响流域非点源污染物输出系数的因素众多，主要

包括流域内的地形地貌、水文、气候、土壤特征、土地利用结构、植被、管理措施以及人类活动等^[19]。目前获取输出系数值较快捷简便、费用低的途径是查阅文献法，但必须基于研究区域的自然环境特征。本文研究流域在空间上位于长江下游，在气候、地形和种植作物种类上与邻近区域的差异不是特别大，且鉴于无曹娥江流域的输出系数试验数据，故可以在一定程度上参照长江中下游地区的输出系数取值。此外，曹娥江流域农业用地主要包括耕地、园地和林地，其中耕地又分水田和旱地。根据王素娜^[20]的调查统计分析，该流域约 81% 的耕地面积为水田，并且钱秀红等^[21]在种植条件相当的杭州地区得出试验结论，水田和旱地的地表径流 TN、TP 排污系数分别为 22.68、3.67 kg/(hm²·a) 和 18.88、3.21 kg/(hm²·a)，因此采用适合曹娥江流域耕地 TN 和 TP 的输出系数为 21.96 和 3.58 kg/(hm²·a)。曹娥江流域属亚热带季风气候区，地形以中、低山和丘陵为主，这与湖北丹江口库区情况相似，从地理环境方面考虑，本文参照方怒放等^[22]在丹江口库区的输出系数取值，选取的曹娥江流域园地和林地的 TN 和 TP 输出系数分别为 12.34、0.98 kg/(hm²·a) 和 6.55、0.18 kg/(hm²·a)。

将畜禽养殖种类分为大牲畜（牛）、猪、羊、家禽 4 类，参照钱秀红等^[21]在杭嘉湖水网平原农业非点源污染的综合调查结果，得到各种畜禽粪尿的排污系数，确定曹娥江流域畜禽养殖的输出系数取值。根据流域农村生活污水排放实际情况，结合国内常用标准，选取流域农村人口 TN 和 TP 的输出系数值为 1.95 和 0.22 kg/(人·a)。以上各种污染源输出系数取值见表 2。

表 1 曹娥江流域 2005—2010 年土地利用面积、畜禽及农村人口数量
Table 1 Status of land use area, livestock and agricultural population in Cao'e river basin in 2005-2010

年份 Year	农业用地面积 Agricultural land/10 ⁴ hm ²			畜禽养殖数量 Livestock and poultry/10 ⁴				农村人口 Agricultural population/10 ⁴
	耕地 Cultivated land	园地 Garden plot	林地 Forest land	大牲畜 Big livestock	猪 Pig	羊 Sheep	家禽 Poultry	
2005	10.26	4.41	6.66	2.08	197.20	28.13	3040.13	231.24
2006	10.26	4.53	5.53	2.02	189.68	30.17	2680.49	227.23
2007	10.28	4.51	5.93	2.07	152.25	30.46	1509.39	229.39
2008	9.43	4.48	5.38	2.01	192.65	27.31	2123.11	219.15
2009	7.87	4.43	6.86	1.69	207.86	23.21	2252.93	221.17
2010	9.33	4.61	8.72	1.61	226.89	24.04	2289.71	222.37

表 2 曹娥江流域农业非点源氮磷负荷的输出系数
Table 2 Export coefficients of agricultural non-point sources nitrogen and phosphorus loads in Cao'e river basin

项目 Item	耕地 Cultivated land/ (kg·hm ⁻² ·a ⁻¹)	园地 Garden plot/ (kg·hm ⁻² ·a ⁻¹)	林地 Forest land/ (kg·hm ⁻² ·a ⁻¹)	大牲畜 Big livestock/ (kg·只 ⁻¹ ·a ⁻¹)	猪 Pig/ (kg·只 ⁻¹ ·a ⁻¹)	羊 Sheep/ (kg·只 ⁻¹ ·a ⁻¹)	家禽 Poultry/ (kg·只 ⁻¹ ·a ⁻¹)	农村人口 Agricultural population/ (kg·人 ⁻¹ ·a ⁻¹)
TN	21.96	12.34	6.55	13.00	0.96	0.49	0.06	1.95
TP	3.58	0.98	0.18	1.55	0.26	0.07	0.02	0.22

2.3.3 流域产污系数的确定

选取绍兴曹娥江水系 12 个市控点位为水质监测断面（见图 1），按地表水水质监测国家标准要求，逢单月监测一次，全年共监测 6 次。对 2005—2010 年度各断面的氮磷监测数据进行核算，获得 TN 和 TP 的数据资料，并结合水域月际径流量情况，利用下游监测断面测得的氮

磷负荷总量减去上游的负荷量而求得的值作为流域出口氮磷负荷实测值。然后，再根据流域农业非点源污染输出负荷计算公式（3）—（4）以及统计得到的各种土地利用类型面积、畜禽数量、农村人口数量（表 1）和相应的输出系数值（表 2），计算求得曹娥江流域 2005—2010 各年的 δ （表 3）。

表 3 曹娥江流域 2005—2010 年的氮磷产污系数
Table 3 Pollutant producing coefficients of nitrogen and phosphorus in Cao'e river basin in 2005-2010

年份 Year	降雨强度 Rainfall intensity/ (mm·a ⁻¹)	雨水 TN 浓度 Concentration of TN in rainfall/ (mg·L ⁻¹)	流域出口负荷实测值 Load value at the exit of basin/ (t·a ⁻¹)		污染物总产生量 Total amount of pollutant M/ (t·a ⁻¹)		流域产污系数 Pollutant producing coefficient δ	
			TN	TP	TN	TP	TN	TP
2005	1 312.99	2.37	7 547.29	547.02	27 952.96	2 103.92	0.27	0.26
2006	1 080.35	2.48	5 564.68	400.71	25 294.09	2 003.26	0.22	0.20
2007	1 375.60	3.38	11 362.17	592.53	34 494.54	1 678.69	0.33	0.35
2008	1 255.90	3.00	7 563.78	447.85	30 243.14	1 849.10	0.25	0.24
2009	1 469.01	2.61	11 939.24	731.52	30 536.25	1 857.55	0.39	0.39
2010	1 475.43	2.36	11 602.50	789.75	29 402.72	1 973.74	0.39	0.40

注：雨水 TN 浓度：因流域降雨中 TP 含量较低，故本表未统计雨水 TP 浓度；污染物总产生量 M：根据 2005—2010 年绍兴市统计年鉴记载得到表 1 数据，并按公式（3）计算流域污染物总产生量 M。
Note: Concentration of TN in rainfall: The concentration of TP in rainfall is low, so this table has not the statistics; Total amount of pollutant (M): Data in table 1 is obtained by Shaoxing Statistic Year Book in 2005—2010, and the total amount of pollutant in Cao'e river basin (M) is calculated by the formula (3).

2.4 氮磷输出系数模型的建立与验证

2.4.1 流域年降雨强度与氮磷产污系数相关关系

本研究得到的农业非点源污染输出负荷量为流域出口的污染负荷量。文献[23]研究表明，流域出口断面上非点源污染负荷量与流域污染物总产生量的比值与流域年径流模数（年平均地表径流量/流域面积）之间存在良好的相关关系，即流域产污系数 δ 与年径流模数有关。此外，降雨作为流域农业非点源污染输出的主要动力，其雨量强

度又是影响地表径流的决定因素^[24-26]。因此，流域产污系数 δ 必与流域年降雨强度之间存在一定函数关系：

$$\delta = f(q_i) \tag{5}$$

式中：q_i 为流域 i 年的年降雨强度，mm/a。

利用表 3 数据进行曲线拟合，发现流域氮磷产污系数与年降雨强度之间存在下列关系（见图 2）：

$$\delta_{\text{TN}} = 0.0383e^{0.0016q_i} \quad (R^2=0.9282) \tag{6}$$

$$\delta_{\text{TP}} = 0.0252e^{0.0019q_i} \quad (R^2=0.9318) \tag{7}$$

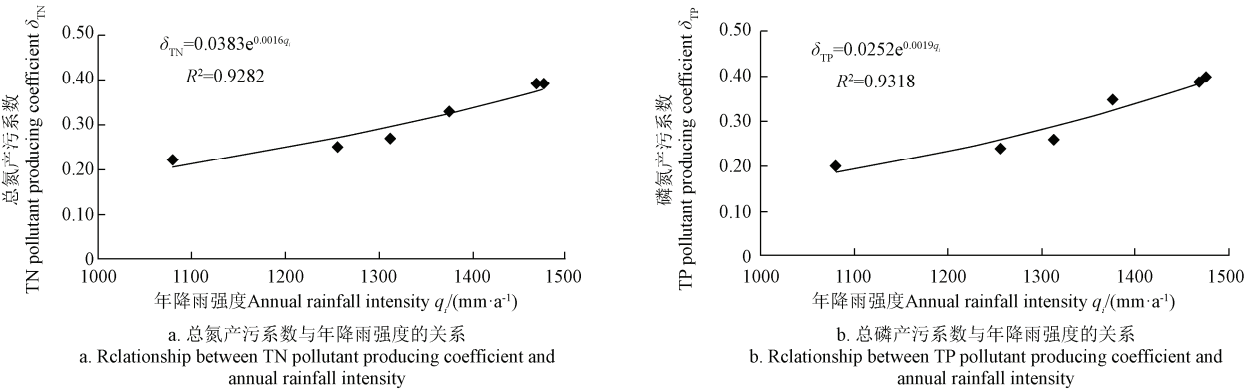


图 2 流域 TN、TP 产污系数与年降雨强度的关系
Fig.2 Relationship between TN、TP pollutant producing coefficient and annual rainfall intensity

2.4.2 氮磷输出系数模型的建立

利用图 2 所确立的流域年降雨强度与氮磷产污系数的相关关系，并结合公式（3）和公式（4），最终建立曹娥江流域农业非点源氮磷输出负荷数学模型为：

$$L'_{\text{TN}} = 0.0383e^{0.0016q_i} \left\{ \sum_{i=1}^m E_{ij} A_i + c \cdot r \right\} \tag{8}$$

$$L'_{\text{TP}} = 0.0252e^{0.0019q_i} \left\{ \sum_{i=1}^m E_{ij} A_i + c \cdot r \right\} \tag{9}$$

可见，流域农业非点源氮磷输出负荷量受降雨影响很大，与年降雨强度呈指数正相关。

2.4.3 氮磷输出系数模型的验证

一般来说，模型的建立需要与实际情况相对比，以验证模型的适用性，但本文是利用 2005—2010 年流域出口氮磷负荷的实测值进行模型参数拟合，由此构建了基

于流域年降雨强度的氮磷输出系数模型。因此，本次研究选定 2011—2012 年为模型验证期。

通过绍兴市统计年鉴资料，查得 2011—2012 年曹娥江流域各县市的土地利用情况及畜禽养殖、农村人口数量，然后累加得到流域 2011—2012 年的基础数据资料（见表 4）。然后，利用绍兴市环境监测中心站所提供的 2011—2012 年曹娥江各监测断面的 TN、TP 实测值，计算得到流域出口氮磷的负荷量，并与改进后模型的模拟值进行对比，分析模型的合理性（见表 5）。

表 5 分别对比了曹娥江流域 TN 和 TP 的输出负荷实测值与模型模拟值。结果显示，使用改进后模型模拟的 2011 年流域氮磷输出负荷量较接近于真实的污染情况，但模型对 2012 年流域 TN 和 TP 污染负荷模拟的适用性较差，与实测值相比，其相对误差分别为 22.41% 和 29.17%，这可能是因为流域 2012 年的年均降雨强度与往年相差特别

大，而降雨的发生时间、地点、量级和时空分布等的不确定性又影响着流域农业非点源污染的输移^[27-29]。由此也进一步说明改进后的模型对曹娥江流域降雨强度适中的年份适用性较好。

表 4 曹娥江流域 2011—2012 年土地利用面积、畜禽及农村人口数量
Table 4 Status of land use area, livestock and agricultural population in Cao'e river basin in 2011-2012

年份 Year	农业用地面积 Agricultural land/10 ⁴ hm ²			畜禽养殖数量 Livestock and poultry/10 ⁴ 只				农村人口 Agricultural population /10 ⁴ 人
	耕地	园地	林地	大牲畜	猪	羊	家禽	
	Cultivated land	Garden plot	Forest land	Big livestock	Pig	Sheep	Poultry	
2011	9.36	4.45	9.30	1.73	236.82	24.36	2225.22	219.77
2012	9.19	4.47	21.28	1.35	238.48	23.71	2150.20	220.02

表 5 模型精度分析
Table 5 Model accuracy analysis

年份 Year	降雨强度 Rainfall intensity/ (mm·a ⁻¹)	雨水 TN 浓度 Concentration of TN in rainfall/ (mg·L ⁻¹)	TN			TP		
			实测值	模拟值	相对误差	实测值	模拟值	相对误差
			Measured value/ (t·a ⁻¹)	simulated value/(t·a ⁻¹)	Relative error/%	Measured value/ (t·a ⁻¹)	simulated value/(t·a ⁻¹)	Relative error/%
2011	1 236.37	2.25	7 848.67	7 152.61	-8.87	456.46	523.66	14.72
2012	1 884.00	1.35	16 111.70	19 723.11	22.41	1 387.10	1 791.73	29.17

注：因流域降雨中 TP 含量较低，故本表未统计雨水 TP 浓度。
Note: The concentration of TP in rainfall is low, so this table has not the statistics.

3 氮磷输出系数模型的应用

利用本文建立的改进输出系数模型估算 2005—2010 年曹娥江流域（绍兴境内部分）不同农业污染源类型（包括降雨输入）产生的氮磷输出负荷量，具体结果如表 6

和表 7 所示。因降雨 TP 浓度较低，本文不考虑其对流域 TP 输出负荷总量的影响。

将农业用地、畜禽养殖、农村生活及降雨等污染源产生的氮磷输出负荷与流域农业非点源氮磷输出总量相比后，得到各污染源的 TN、TP 贡献率（见图 3）。

表 6 曹娥江流域 2005—2010 年农业污染源 TN 输出负荷估算值
Table6 Estimated export loads for agricultural pollution sources TN in Cao'e river basin in 2005-2010

年份 Year	农业用地 Agricultural land			畜禽养殖 Livestock and poultry				农村生活 Rural residents	降雨 Rainfall	合计 Total
	耕地	园地	林地	大牲畜	猪	羊	家禽			
	Cultivated land	Garden plot	Forest land	Big livestock	Pig	Sheep	Poultry			
2005	705.24	170.34	136.54	84.64	592.56	43.14	570.95	1 411.42	5 034.70	8 749.55
2006	486.05	120.59	78.14	56.65	392.82	31.89	346.95	955.88	2 987.62	5 456.60
2007	781.07	192.56	134.39	93.11	505.70	51.64	313.34	1 547.65	8 315.32	11 934.77
2008	591.60	157.94	100.67	74.65	528.36	38.23	363.92	1 220.85	5 563.79	8 640.01
2009	694.35	219.63	180.52	88.27	801.70	45.69	543.09	1 732.74	7 962.39	12 268.38
2010	831.66	230.91	231.84	84.96	884.14	47.81	557.65	1 760.12	7 305.83	11 934.93

表 7 曹娥江流域 2005—2010 年农业污染源 TP 输出负荷估算值
Table 7 Estimated export loads for agricultural pollution sources TP in Cao'e river basin in 2005-2010

年份 Year	农业用地 Agricultural land			畜禽养殖 Livestock and poultry				农村生活 Rural residents	合计 Total
	耕地	园地	林地	大牲畜	猪	羊	家禽		
	Cultivated land	Garden plot	Forest land	Big livestock	Pig	Sheep	Poultry		
2005	112.16	13.20	3.66	9.85	156.57	6.01	185.67	155.35	642.47
2006	72.09	8.71	1.95	6.15	96.80	4.15	105.22	98.12	393.19
2007	126.58	15.20	3.67	11.04	136.15	7.33	103.83	173.57	577.38
2008	92.49	12.03	2.65	8.54	137.23	5.24	116.34	132.09	506.61
2009	115.72	17.83	5.07	10.76	221.98	6.67	185.07	199.86	762.97
2010	138.88	18.78	6.53	10.38	245.28	7.00	190.40	203.41	820.65

注：本表未估算降雨产生的 TP 输出负荷。
Note: Export load for rainfall TP is not estimated in this table.

对比表 6 和表 7 中的数据可以发现，2005—2010 年曹娥江流域历年的 TN 输出负荷总量要远大于 TP 的输出负荷总量，最高达 20.67 倍，而且农业非点源氮磷输出负荷量的时间分布不均，年输出总量 TN 为 5 456.60～12 268.38 t，TP 为 393.19～820.65 t，这主要是由于流域年降雨强度变化较大，通常降雨量小的年份，形成的地

表径流量较少，携带的污染物流失量亦较少，因此，污染输出负荷量相对较低。此外，降雨对流域 TN 输出负荷的贡献率较大（见图 3a），为 54.75%～69.67%，除农业用地、畜禽养殖、农村生活等因素外，降雨已成为影响曹娥江流域农业非点源 TN 输出负荷的一个重要因素，不容忽视。

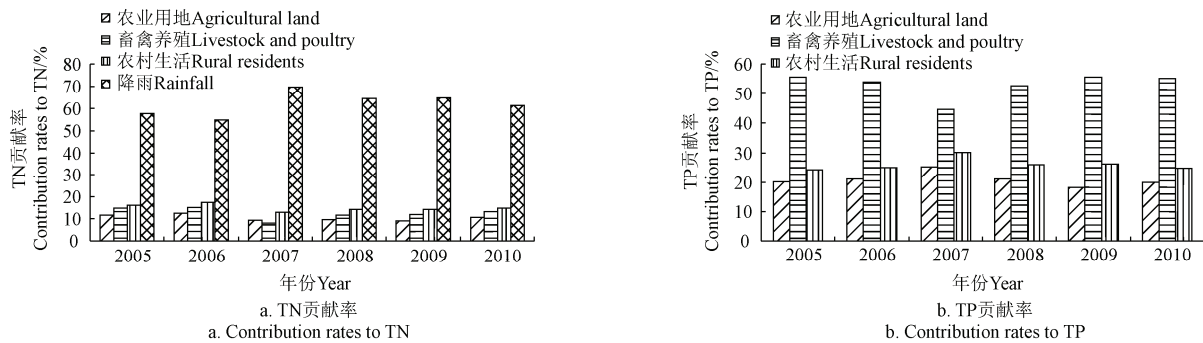


图3 曹娥江流域2005–2010年农业污染源TN、TP贡献率

Fig.3 Contribution rates to TN, TP from various agricultural pollution sources in Cao'e river basin in 2005–2010

由图3a还可以发现,不同农业污染源类型对流域TN输出负荷量贡献率的大小顺序是:农村生活>畜禽养殖>农业用地。农村环境基础设施薄弱,缺少生活污水收集管网,污水未经处理直接排向水体,加上生活垃圾随意倾倒,已使得农村生活成为曹娥江流域TN输出的首要农业污染源。然而,图3b显示不同农业污染源类型对TP输出负荷量贡献率的大小顺序为:畜禽养殖>农村生活>农业用地,畜禽养殖业对TP输出负荷的贡献明显大于农村生活和农业用地对其的贡献,贡献率达44.75%~55.74%。这些数据均表明,近几年快速发展的畜禽养殖业的粪便污染问题也需引起足够重视。相比而言,农业用地对流域TN、TP输出负荷量的贡献率较小,但耕地的氮磷输出负荷量历年均大于园地和林地(见表6和表7),因此,今后有必要进一步控制流域农田过量施肥,减少氮磷流失。

4 讨论

基于曹娥江流域年降雨强度与降雨产汇流过程氮磷输移强度的关系,本研究初步构建了新型农业非点源氮磷输出系数模型,这为资料缺乏的流域农业非点源污染负荷调查提供了新思路。而且,江浙沿海地区在气象、地形和种植作物种类等方面均与本文研究的流域较为相近,因此该模型具有一定的适用性。然而,影响流域农业非点源污染输移机理的因素众多,模型参数又存在较大的不确定性,如土壤和植被截流、降解等对污染物滞留作用的不确定性,以及降雨的发生时间、地点、量级和时空分布等的不确定性。若忽略这些参数的不确定性问题,则可能会导致流域非点源污染输出负荷模拟结果的较大误差。如2012年曹娥江流域年降雨强度为1884.00 mm/a,高出往年年均降雨强度近43%,致使TN和TP污染负荷模拟值与实测值相比,其相对误差较大,分别为22.41%和29.17%,因此,今后应加强各区域降雨径流监测,并开展模型参数的不确定性研究,进一步提高此改进后模型的精确度,以期应用于探索流域农业非点源污染负荷的空间关系。

5 结论

本文在Johnes输出系数模型的基础上,从降雨对流域氮磷输出负荷的影响出发,将流域不同营养源及降雨

携带的污染物“合成”考虑,分析了年降雨强度与流域氮磷产污系数之间的相关关系,发现二者呈指数正相关,并以此函数关系建立了曹娥江流域农业非点源氮磷输出负荷模型,最终利用此改进后模型估算并分析了流域农业污染源氮磷输出负荷量。结果显示,受年降雨强度的影响,流域农业非点源氮磷输出负荷时间分布不均,2005–2010年输出总量TN为5456.60~12268.38 t,TP为393.19~820.65 t,变化幅度较大,且降雨对流域TN输出负荷的贡献率高达54.75%~69.67%。不同污染源对流域TN输出负荷量的贡献率大小顺序是:农村生活>畜禽养殖>农业用地,而对TP输出负荷量的贡献率大小顺序是:畜禽养殖>农村生活>农业用地,这说明目前曹娥江流域农业非点源氮磷输出负荷主要来源于人畜,应综合治理农村生活污水及垃圾的排放、解决畜禽养殖业的粪便污染问题,同时需进一步加强农田施肥管理,以减少耕地氮磷流失。

[参考文献]

- [1] 吴磊,龙天渝,王玉霞,等.基于分布式水文模型的嘉陵江流域氮磷非点源污染负荷预测[J].农业工程学报,2011,27(3):55–60.
Wu Lei, Long Tianyu, Wang Yuxia, et al. Prediction of non-point source nitrogen and phosphorus pollution load in Jialing River watershed based on distributed hydrological model[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2011, 27(3): 55–60. (in Chinese with English abstract)
- [2] 邹桂红,崔建勇.基于AnnAGNPS模型的农业非点源污染模拟[J].农业工程学报,2007,23(12):11–17.
Zou Guihong, Cui Jianyong. Simulation of agricultural non-point pollution based on AnnAGNPS model[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2007, 23(12): 11–17. (in Chinese with English abstract)
- [3] Rasolomanana S D, Lessard P, Vanrolleghem P A. Single-objective vs. multi-objective autocalibration in modeling total suspended solids and phosphorus in a small agricultural watershed with SWAT[J]. Water Science and Technology, 2012, 65(4): 643–652.
- [4] 张展羽,司涵,孔莉莉.基于SWAT模型的小流域非点源氮磷迁移规律研究[J].农业工程学报,2013,29(2):93–100.
Zhang Zhanyu, Si Han, Kong Lili. Migration of non-point source nitrogen and phosphorus in small watershed based on SWAT model[J]. Transactions of the Chinese Society of

- Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2013, 29(2): 93—100. (in Chinese with English abstract)
- [5] 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 modeling approach[J]. Journal of Hydrology, 1996, 183(3/4): 323—349.
- [6] 张微微, 李红, 孙丹峰, 等. 怀柔水库上游农业氮磷污染负荷变化[J]. 农业工程学报, 2013, 29(24): 124—131. Zhang Weiwei, Li Hong, Sun Danfeng, et al. Pollution loads variation of agricultural source in upstream of Huairou Reservoir[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2013, 29(24): 124—131. (in Chinese with English abstract)
- [7] Ierodionou D, Laurenson L, Leblanc M, et al. The consequences of land use change on nutrient exports: a regional scale assessment in south-west Victoria, Australia[J]. Journal of Environmental Management, 2005, 74(4): 305—316.
- [8] 刘瑞民, 沈珍瑶, 丁晓雯, 等. 应用输出系数模型估算长江上游非点源污染负荷[J]. 农业环境科学学报, 2008, 27(2): 677—682. Liu Ruimin, Shen Zhenyao, Ding Xiaowen, et al. Application of export coefficient model in simulating pollution load of non-point source in upper reach of Yangtze river basin[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2008, 27(2): 677—682. (in Chinese with English abstract)
- [9] 李怀恩, 王莉, 史淑娟. 南水北调中线陕西水源区非点源总氮负荷估算[J]. 西北大学学报: 自然科学版, 2010, 40(3): 540—544. Li Huaen, Wang Li, Shi Shujuan. Estimation of total nitrogen load from non-point sources in Shaanxi Province water source area of the central line of South-North Water Diversion Project[J]. Journal of Northwest University: Natural Science Edition, 2010, 40(3): 540—544. (in Chinese with English abstract)
- [10] 刘亚琼, 杨玉林, 李法虎. 基于输出系数模型的北京地区农业面源污染负荷估算[J]. 农业工程学报, 2011, 27(7): 7—12. Liu Yaqiong, Yang Yulin, Li Fahu. Estimation of pollution loads from agricultural nonpoint sources in Beijing region based on export coefficient modeling approach[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2011, 27(7): 7—12. (in Chinese with English abstract)
- [11] 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, 2008, 17(2): 307—312. Li Huaen, Zhuang Yongtao. The export coefficient modeling approach for load prediction of nutrient from nonpoint source and its application[J]. Journal of Xi'an University of Technology, 2008, 17(2): 307—312. (in Chinese with English abstract)
- [12] 龙天渝, 梁常德, 李继承, 等. 基于 SLURP 模型和输出系数法的三峡库区非点源氮磷负荷预测[J]. 环境科学学报, 2008, 28(3): 574—581. Long Tianyu, Liang Changde, Li Jicheng, et al. Forecasting the pollution load of non-point sources imported to the three gorges reservoir[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2008, 28(3): 574—581. (in Chinese with English abstract)
- [13] 丁晓雯, 沈珍瑶, 刘瑞民, 等. 基于降雨和地形特征的输出系数模型改进及精度分析[J]. 长江流域资源与环境, 2008, 17(2): 306—309. Ding Xiaowen, Shen Zhenyao, Liu Ruimin, et al. Improved export coefficient model considering precipitation as well as terrain and its accuracy analysis[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2008, 17(2): 306—309. (in Chinese with English abstract)
- [14] 陆建忠, 陈晓玲, 肖靖靖, 等. 改进的输出系数法在农业污染源估算中的应用[J]. 华中师范大学学报: 自然科学版, 2012, 46(3): 373—378. Lu Jianzhong, Chen Xiaoling, Xiao Jingjing, et al. Application of improved export coefficient model in estimation of agricultural source pollutant[J]. Journal of Huazhong Normal University: Natural Science, 2012, 46(3): 373—378. (in Chinese with English abstract)
- [15] 金树权, 吕军, 陈丁江, 等. 曹娥江三典型支流的水质对比研究[J]. 水土保持学报, 2006, 20(5): 121—125. Jin Shuquan, Lu Jun, Chen Dingjiang, et al. Comparative study of water quality of three typical tributaries within Cao-e river system[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2006, 20(5): 121—125. (in Chinese with English abstract)
- [16] 陈成广, 赵轻舟, 胡保卫. 双季晚稻田灌溉径流氮磷分布特征研究[J]. 水利学报, 2013, 44(2): 238—242. Chen Chengguang, Zhao Qingzhou, Hu Baowei. Study on distribution characteristics of Nitrogen and Phosphorus in irrigation runoff from double-cropping late rice field[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2013, 44(2): 238—242. (in Chinese with English abstract)
- [17] Johnes 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.
- [18] 余红, 沈珍瑶. 大宁河流域非点源污染不确定性分析[J]. 北京师范大学学报: 自然科学版, 2008, 44(1): 86—91. Yu Hong, Shen Zhenyao. Uncertainty analysis of non-point source pollution in Daning river[J]. Journal of Beijing Normal University: Natural Science, 2008, 44(1): 86—91. (in Chinese with English abstract)
- [19] 应兰兰, 侯西勇, 路晓, 等. 我国非点源污染研究中输出系数问题[J]. 水资源与水工程学报, 2010, 21(6): 90—95. Ying Lanlan, Hou Xiyong, Lu Xiao, et al. Discussion on the export coefficient method in non-point source pollution studies in China[J]. Journal of Water Resources & Water Engineering, 2010, 21(6): 90—95. (in Chinese with English abstract)
- [20] 王素娜. 曹娥江支流水质评价与河流水系环境容量分析[D]. 杭州: 浙江大学, 2005. Wang Suna. Water Quality Assessment and Water Environmental Capacity Analysis in Branches of Cao-e River[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2005. (in Chinese with English abstract)
- [21] 钱秀红, 徐建民, 施加春, 等. 杭嘉湖水网平原农业非点源污染的综合调查和评价[J]. 浙江大学学报: 农业与生命科学版, 2002, 28(2): 147—150. Qian Xiuhong, Xu Jianmin, Si Jiachun, et al. Comprehensive survey and evaluation of agricultural nonpoint source pollution in Hang-Jia-Hu water-net plain[J]. Journal of Zhejiang University: Agricultural and Life Science, 2002, 28(2): 147—150. (in Chinese with English abstract)
- [22] 方怒放, 史志华, 李璐. 基于输出系数模型的丹江口库区非点源污染时空模拟[J]. 水生态学杂志, 2011, 32(4): 7—12. Fang Nufang, Shi Zhihua, Li Lu. Application of export coefficient model in simulating pollution load of non-point source in Danjiangkou reservoir area[J]. Journal of Hydroecology, 2011, 32(4): 7—12. (in Chinese with English abstract)
- [23] Behrendt H. Inventories of point and diffuse sources and estimated nutrient loads: a comparison for different river basins in central Europe[J]. Water Science and Technology, 1996, 33(4/5): 99—107.
- [24] 吴希媛, 张丽萍. 降水再分配受雨强、坡度、覆盖度影响的机理研究[J]. 水土保持学报, 2006, 20(4): 28—30.

- Wu Xiyuan, Zhang Liping. Research on effecting factors of precipitation's redistribution of rainfall intensity, gradient and cover ratio[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2006, 20(4): 28—30. (in Chinese with English abstract)
- [25] 张亚丽, 张兴昌, 邵明安, 等. 降雨强度对黄土坡面矿质氮素流失的影响[J]. 农业工程学报, 2004, 20(3): 55—58. Zhang Yali, Zhang Xingchang, Shao Mingan, et al. Impact of rainfall intensity on soil mineral nitrogen loss by runoff on loess slope[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2004, 20(3): 55—58. (in Chinese with English abstract)
- [26] 罗春燕, 涂仕华, 庞良玉, 等. 降雨强度对紫色土坡耕地养分流失的影响[J]. 水土保持学报, 2009, 23(4): 24—27. Luo Chunyan, Tu Shihua, Pang Liangyu, et al. Effect of rain intensity on nutrient losses from sloping land of purple soil[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2009, 23(4): 24—27. (in Chinese with English abstract)
- [27] 王慧亮, 李叙勇, 解莹. 多模型方法在非点源污染负荷中的应用展望[J]. 水科学进展, 2011, 22(5): 727—732.
- Wang Huiliang, Li Xuyong, Xie Ying. Application prospects of multi-model approach for modeling non-point source pollution[J]. Advances in Water Science, 2011, 22(5): 727—732. (in Chinese with English abstract)
- [28] 张巍, 郑一, 王学军. 水环境非点源污染的不确定性分析方法[J]. 农业环境科学学报, 2008, 27(4): 1290—1296.
- Zhang Wei, Zheng Yi, Wang Xuejun. Review on uncertainty analysis methods for non-point sources pollution[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2008, 27(4): 1290—1296. (in Chinese with English abstract)
- [29] 刘毅, 陈吉宁, 杜鹏飞. 环境模型参数识别与不确定性分析[J]. 环境科学, 2002, 23(6): 6—10.
- Liu Yi, Chen Jining, Du Pengfei. Parameters identification and uncertainty analysis for environmental model[J]. Environmental Science, 2002, 23(6): 6—10. (in Chinese with English abstract)

Improvement of export coefficient model for N and P based on rainfall intensity and its application

Xu Lihong¹, Chen Chengguang², Hu Baowei^{3*}, Xing Bo¹, Ye Lujie¹

(1. Shaoxing Enviromental Monitoring Center, Shaoxing 312000, China; 2. Department of Life Sciences for Shaoxing University Yuanpei College, Shaoxing 312000, China; 3. Shaoxing University, Shaoxing 312000, China)

Abstract: In order to study the output loads of TN (total nitrogen) and TP (total phosphorus) from agricultural non-point sources in Cao'e River basin in Shaoxing, an improved export coefficient model for TN and TP was firstly established. According to the theory of black box, the TN and TP from rainfall and agricultural pollution sources were respectively integrated to the total amount of pollutant in this model, and the output intensity of TN and TP in the transportation process was taken into account for the pollutant producing coefficient for the basin, which reflected the effects on the output of TN and TP due to the various losses during the process of rainfall runoff and pollutant transport. After that, the total output loads of TN and TP from agricultural non-point sources during 2005-2010 were estimated using this improved export coefficient model, in which the basic data were obtained from Shaoxing Statistical Yearbook. When the values predicated by the model were compared with those measured by the experiments, the authors found that the total output loads of TN and TP from agricultural non-point sources during 2005-2010 were greatly influenced by rainfall. The total output loads of TN and TP had a positive exponential relationship with the annual rainfall intensity, and therefore a new improved export coefficient model for TN and TP based on rainfall intensity was also established. Finally, this new model was applied to estimate the output loads of TN and TP from various agricultural pollution sources in Cao'e River basin. The estimation results showed that the total output loads of TN were annually far greater than that of TP from agricultural non-point sources during 2005-2010, and the maximum was up to 20.67 times, but with the influence of annual rainfall intensity, they presented uneven temporal distribution during 2005-2010, and the annual total output loads of TN ranged from 5456.60 to 12268.38 t and those of TP ranged from 393.19 to 820.65 t. In those years, when the rainfall intensity was small, the total output loads of TN and TP were both relatively low, and the contributions of rainfall to output loads of TN were up to 54.75%-69.67%, indicating that rainfall had become a key pollution source for TN output in Cao'e River basin. In addition, the results also showed that the order for the contributions of various agricultural pollution sources to output loads of TN from high to low was as follows: rural residents, livestock and poultry, and agricultural land. As a result of shortage of environmental infrastructure in rural area, deficiency of life sewage collection pipe, discharging the polluted water into river directly, and letting off waste randomly, rural life became primary agricultural pollution source to the output of TN in Cao'e River basin. However, the contributions of various agricultural pollution sources to output loads of TP decreased in the order of livestock and poultry, rural residents and agricultural land, and the contributions to output loads of TP from livestock and poultry (44.75%-55.74%) were significantly greater than that from rural residents in Cao'e River basin, showing that the problem of fecal pollution should be paid enough attention with the rapid development of livestock and poultry breeding industry. In comparison, the contributions to output loads of TN and TP from agricultural land were smaller, but the output loads of TN and TP from cultivated land were annually greater than that from garden plot and forest land. Therefore, it was necessary to further control the excessive fertilization in agricultural land to reduce the loss of nitrogen and phosphorus. The improved export coefficient model for TN and TP in this paper had certain applicability in Zhejiang area, however, in order to further improve the accuracy of the model, it was still necessary to strengthen the monitoring of regional rainfall runoff and the study on the uncertainty of model parameters in the future.

Key words: models; nitrogen; phosphorus; export coefficient model; annual rainfall intensity; Cao'e river basin; pollutant producing coefficient