
基于阶段输出系数模型的农业非点源 污染负荷估算与评价——以四川省为例

桂平婧¹, 王丰¹, 李善朴¹, 周希², 邹立扣², 范良千^{1,*1}

1. 四川农业大学 土木工程学院, 四川 都江堰 611830;

2. 四川农业大学 环境学院, 四川 成都 611130

摘要: 传统的农业非点源污染负荷输出系数模型无法实现农业非点源污染阶段负荷估算。本研究综合考虑农业用地、畜禽养殖和农村生活, 从产生、流失、入河 3 阶段分别建立了农业非点源污染负荷估算模型, 并以四川省为例, 估算了 2012 年农业非点源 TN(总氮)、TP(总磷) 3 个阶段的污染负荷量, 分析了其主要来源及污染区域。结果显示, 产生阶段中农业用地是主要污染源, 遂宁、巴中、雅安和德阳产生负荷强度较高。流失和入河阶段中畜禽养殖成为主要污染源, 阿坝流失负荷强度最大, 遂宁水质受农业非点源污染影响最严重。研究表明, 阶段输出系数模型能简便可靠地实现农业非点源污染阶段负荷估算。该研究可为农业非点源污染的源头控制、迁移过程控制和受纳水体修复提供支撑。

关键词: 农业非点源污染; 负荷; 总磷; 总氮; 阶段输出系数模型

中图分类号:X522 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-1524(2016)01-0110-09

doi: 10.3969/j.issn.1004-1524.2016.01.19

全球农业非点源污染对水环境的影响日趋严重^[1]。我国农业非点源(不包括典型地区农村生活源)总磷(TP)、总氮(TN)排放量占全国总排放量的 67%和 57%, 农业非点源已成为水环境的主要污染源^[2]。开展农业非点源污染控制与管理方面的相关研究势在必行。

估算农业非点源污染负荷与确定污染重点控制区域是进行非点源污染管理与控制的基础^[3]。模型法是农业非点源污染负荷估算的主要方法之一^[4]。国内外现有的农业非点源污染负荷估算模型包括机理模型、经验模型以及输出系数模型^[5]。机理模型可实现农业非点源负荷的精确估算, 如 HSPF 模型^[6]、AGNPS 模型^[7]、SWAT 模型^[8]及 SLURP 模型^[9]等。然而, 机理模型结构复杂、对资料和数据要求高, 一般只适合小范围非点源污染过程的模拟^[10]。经验模型对资料要求低, 但缺乏机理基础, 精度往往较低^[11]。输出系数模型对数据要求较低, 估算结果也具有较高精准度, 在农业非点源污染负荷估算研究方面受到了大量学者的关注

¹ *通信作者, 范良千, E-mail: flqjacky@163.com

作者简介: 桂平婧(1992—), 女, 重庆渝北人, 本科生, 从事市政工程方向研究。E-mail: gpjmututu@163.com

收稿日期: 2015-04-24

基金: 四川省教育厅重点项目(14ZA0004)

^[12]。然而，这些模型也存在未考虑污染物迁移损失、土地利用分类简单、输出系数忽略年际变化等问题^[13, 14]。为提高输出系数模型的精确性，大量学者基于上述问题对模型进行了修正与补充^[15, 16, 17]。尽管如此，各种输出系数模型仍不能实现阶段农业非点源污染负荷估算。随农业非点源研究的不断深入，越来越多的研究显示，农业非点源污染控制应涵盖源头、迁移过程和受纳水体 3 方面^[18]。因此，估算农业非点源污染负荷也应分阶段，即产生、流失、入河阶段。

本研究依托输出系数模型，从产生、流失、入河 3 阶段建立了农业非点源污染负荷估算模型，并以四川省为例，对该区域 2012 年 TN、TP 的 3 阶段负荷进行估算与评价，旨在实现农业非点源污染阶段负荷估算，并为农业非点源污染的源头控制、迁移过程控制和受纳水体修复提供更为准确的理论依据。

1 研究方法

1.1 区域概况

四川省地处长江上游，辖区面积 486 000 km²，下辖 18 个地级市和 3 个自治州。2012 年，全省农业人口 6 585.34 万，占总人口的 72.39%。常年农作物种植面积 9 666 700~10 000 000 hm²，年末实有耕地面积 3 990 000 hm²。农业产值 2 764.9 亿元，占全省农林牧副渔总产值的 50.89%^[19, 20]。四川省属全国水资源丰富的省份之一，省内多年平均降水量约为 4 889.75×10⁸ m³，共有 1 300 多条大小河流，1 000 多个湖泊，200 余条冰川和一定面积的沼泽，主要河流有长江、沱江、岷江、嘉陵江、涪江和金沙江等。

1.2 研究思路与技术路线

农业非点源污染的来源主要包括土地利用、畜禽养殖和农村生活污水及废弃物等^[21]，相应地将农业非点源污染源归结为农业用地、畜禽养殖、农村生活 3 类。为保证估算精度，研究中依据行政区划将四川省划分为 21 个估算地区，分别估算各地区农业非点源 TN 和 TP 在产生、流失、入河阶段的污染负荷。各地区各阶段污染负荷汇总即为全省各阶段污染负荷总量。获得估算结果后，利用聚类分析法、空间分布图法、单位水质指数法对产生、流失、入河负荷强度进行分析。具体技术路线见图 1。

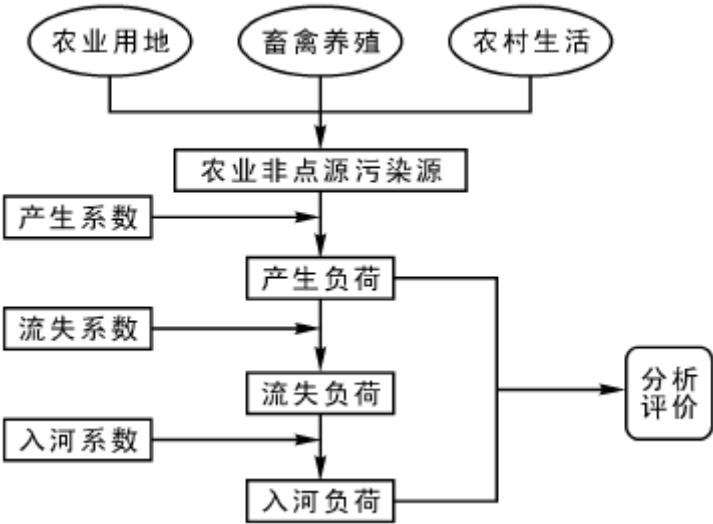


图 1 技术路线图

1.3 模型建立与数据获取

1.3.1 产生阶段

$$\begin{cases} \text{农业用地: } I_p = \sum N_p \cdot I_{pc} \\ \text{畜禽养殖: } I_b = \sum N_b \cdot I_{bc} \cdot D \cdot 10^{-2} \\ \text{农村生活: } I_r = \sum N_r \cdot I_{rc} \cdot 10 \end{cases} \quad (1)$$

式(1)中, I_p 为农业用地产生负荷, 指施入肥料所含的 TN 或 TP 量($t \cdot a^{-1}$); I_b 为畜禽养殖产生负荷, 指畜禽粪便所含的 TN 或 TP 量($t \cdot a^{-1}$); I_r 为农村生活产生负荷, 指农村人口产生的生活污水、生活垃圾和人体粪尿所含的 TN 或 TP 量($t \cdot a^{-1}$); N_p 为各地区肥料(氮肥、磷肥或复合肥)年施用量(t), 由《四川统计年鉴》^[20]获得; I_{pc} 为肥料(氮肥、磷肥或复合肥)的 TN 或 TP 产生系数(%), 即氮肥、磷肥或复合肥中氮素或磷素折算百分比, 查阅文献^[20]和^[22]获得; N_b 为各地区畜禽(猪、牛、羊、家禽或家兔)的饲养量($\times 104 \text{ capita}$), 通过《四川农村年鉴》^[19]获得; I_{bc} 为畜禽(猪、牛、羊、家禽或家兔)的 TN 或 TP 产生系数($g \cdot \text{capita}^{-1} \cdot d^{-1}$), 即单个畜禽在一天内所产生的 TN 或 TP 含量, 查阅文献^[23-27]获得; D 为畜禽的饲养周期(d), 猪、牛、羊、家禽和家兔的饲养周期分别取 150, 365, 365, 60 和 90 d ^[27]。 N_r 为各地区农村常住人口数($\times 104 \text{ 人}$), 以农业人口数乘以折算系数表示, 农业人口数可通过《四川统计年鉴》^[20]获得, 人口折算系数依据姚静等^[28]研究中提出的方法确定; I_{rc} 为农村生活废弃物(生活垃圾、生活废水或人体粪尿)的 TN 或 TP 产生系数($kg \cdot \text{人}^{-1} \cdot a^{-1}$), 即每人每年所产生的各类废弃物中 TN 或 TP 含量, 查阅文献^[29, 30, 31, 32, 33, 34, 35]获得。表 1 给出了四川省各地区 2012 年农业人口折算系数, 表 2 给出了 I_{pc} , I_{bc} 和 I_{rc} 具体取值。

表 1 四川省各地区 2012 年农业人口折算系数

农业人口	地区
折算系数	
1	成都、自贡、攀枝花、德阳、绵阳、内江、乐山、眉山、宜宾、资阳
0.95	泸州、广元、遂宁、南充、广安、达州、雅安、阿坝、凉山
0.8	巴中、甘孜

表 2 农业非点源污染物产生系数表

污染物	肥料/%			畜禽养殖/($g \cdot \text{capita}^{-1} \cdot d^{-1}$)					农村生活/($kg \cdot \text{人}^{-1} \cdot a^{-1}$)		
	复合肥	磷肥	氮肥	猪	牛	羊	家禽	兔	生活垃圾	生活废水	人体粪尿
TN	38.79	0	100	15.36	104.1	6.25	0.71	0.99	2.59	1.04	3.06

TP	22.05	43.7	0	3.39	10.17	1.23	0.06	0.33	0.89	0.04	0.52
----	-------	------	---	------	-------	------	------	------	------	------	------

1.3.2 流失阶段

$$\begin{cases} \text{农业用地: } Op = \sum A \times F \times Op_c \times C_{ct} \times C_{cr} \\ \text{畜禽养殖: } Ob = \sum Nb \times Ob_c \times D \times 10^{-2} \\ \text{农村生活: } Or = \sum Ir \times Or_c \end{cases} \quad (2)$$

式(2)中, Op 为农业用地流失负荷, 指农业用地 TN 或 TP 产生负荷中流失进入环境的量($t \cdot a^{-1}$); Ob 为畜禽养殖流失负荷, 指畜禽养殖 TN 或 TP 产生负荷流失进入环境的量($t \cdot a^{-1}$); Or 为农村生活流失负荷, 指农村生活 TN 或 TP 产生负荷流失进入环境的量($t \cdot a^{-1}$); A 为各地区不同类型农业用地(水田、旱地、蔬菜地或果园地)面积(km^2), 通过《四川统计年鉴》^[20]获得; F 为各地区单位面积不同类型农业用地(水田、旱地、蔬菜地或果园地)肥料施入量的 TN 或 TP 含量($t \cdot km^{-2}$)。由于统计年鉴中未统计详细的各地区不同类型农业用地肥料施入量, 计算过程中, F 值均由各地区 $I_p/\Sigma A$ 表示^[36]; Op_c 为不同耕地类型中 TN 或 TP 的流失系数(%), 通过文献^[25]和^[37]获得。各地区地形和降雨量对 Op_c 有一定影响, 应通过地形修正系数(C_{ct})和降雨修正系数(C_{cr})对 Op_c 进行相应的修正^[29, 38]。 C_{ct} 取值参考文献^[23]; C_{cr} 取值方法参考文献^[23]和^[38]。各地区地形修正系数和降雨修正系数见表 3。 Ob_c 为畜禽(猪、牛、羊、家禽或家兔)的 TN, TP 流失系数($g \cdot capita^{-1} \cdot d^{-1}$), 即单个畜禽每天产生的 TN 或 TP 流失进入环境的负荷, 参考文献^[23, 24, 25, 26, 27]获得; Or_c 为农村生活中各类废弃物(生活垃圾、生活废水和人体粪尿)中 TN 或 TP 流失系数(%), 即流失到环境的各类废弃物的 TN 或 TP 负荷占各类废弃物的 TN 或 TP 产生负荷比例, 参考文献^[29]和^[39]获得。 Nb 和 D 同式(1)。表 4 给出了 Op_c , Ob_c 和 Or_c 具体数据。

表 3 四川省 2012 年各地区流失修正系数

修正项	修正系数	地区
地形修正	1	成都
	1.2	自贡、泸州、德阳、绵阳、广元、遂宁、内江、南充、眉山、广安、资阳
	1.5	攀枝花、乐山、宜宾、达州、雅安、巴中、阿坝、甘孜、凉山
降雨量修正	1.1	成都
	1.2	攀枝花、绵阳、甘孜
	1.3	德阳
	1.4	广元、眉山、阿坝
	1.5	自贡、遂宁、广安、资阳
	1.6	南充、达州、巴中

1.7	内江、宜宾、凉山
1.8	泸州、乐山
2.2	雅安

表 4 农业非点源污染物流失系数

污染物	农业用地/%				畜禽养殖/(g • capita-1 • d-1)					农村生活/%		
	水田	旱地	果园地	蔬菜地	猪	牛	羊	家禽	兔	生活垃圾	生活污水	人体粪尿
TN	0.577	0.467	0.271	1.64	7.19	34.9	2.186	0.22	0.347	42	70	4
TP	0.671	0.644	0.085	0.935	0.94	3.91	0.432	0.04	0.116	42	70	4

1.3.3 入河阶段

$$\begin{cases} \text{农业用地} : R_p = \sum O_p \times R_{pc} \times C_{ct} \times C_{cd} \\ \text{畜禽养殖} : R_b = \sum O_b \times R_{bc} \times C_{ct} \times C_{cr} \\ \text{农村生活} : R_r = \sum O_r \times R_{rc} \times C_{ct} \times C_{cr} \end{cases} \quad (3)$$

式(3)中， R_p 为农业用地入河负荷，指农业用地 TN 或 TP 流失负荷中最终进入河道的量($t \cdot a^{-1}$)； R_b 为畜禽养殖入河负荷，指畜禽养殖 TN 或 TP 流失负荷中最终进入河道的量($t \cdot a^{-1}$)； R_r 为农村生活入河负荷，指农村生活 TN 或 TP 流失负荷中最终进入河道的量($t \cdot a^{-1}$)。估算入河负荷，首先应确定入河系数。入河系数是污染物入河量和流失量的比率，由基础入河系数与相应的入河修正系数构成。与式(3)相对应， R_{pc} 为各地区农业用地流失负荷基础入河系数，根据降雨量确定^[40]； C_{ct} 为根据各地区地形确定的入河修正系数，取值与式(2)中一致(表 3)； C_{cd} 为根据各地区内流经河流等级确定的污染物入河修正系数，I 类地区取 1.2，II 类地区取 1.0^[29]； R_{bc} 为各地区畜禽养殖流失负荷基础入河系数。研究区域内，根据各地区内流经河流等级，将各地区分为两类，I 类表示有干流或一级支流流经的地区，II 类表示有二级支流流经的地区，I 类地区 R_{bc} 取 0.30，II 类地区 R_{bc} 取 0.25^[29]。 C_{cr} 为根据各地区降雨量确定的污染物入河修正系数，取值与式(2)中一致(表 3)； R_{rc} 为农村生活流失负荷基础入河系数，采用相关研究^[41, 42, 43, 44]中建议的方法确定。各地区基础入河系数见表 5。

表 5 四川省各地区基础入河系数表

地区	分类	农业	畜禽	农村生活	
		用地	养殖	生活污水	生活垃圾或人体粪尿

成都	I	0.01	0.3	0.35	0.1
自贡	I	0.04	0.3	0.35	0.1
攀枝花	I	0.02	0.3	0.35	0.1
泸州	I	0.07	0.3	0.35	0.1
德阳	II	0.03	0.25	0.3	0.075
绵阳	II	0.02	0.25	0.3	0.075
广元	I	0.04	0.3	0.35	0.1
遂宁	II	0.05	0.25	0.3	0.075
内江	I	0.06	0.3	0.35	0.1
乐山	I	0.07	0.3	0.35	0.1
南充	I	0.05	0.3	0.35	0.1
眉山	I	0.04	0.3	0.35	0.1
宜宾	I	0.06	0.3	0.35	0.1
广安	I	0.04	0.3	0.35	0.1
达州	II	0.05	0.25	0.3	0.075
雅安	II	0.1	0.25	0.3	0.075
巴中	II	0.05	0.25	0.3	0.075
资阳	I	0.04	0.3	0.35	0.1
阿坝	I	0.04	0.3	0.35	0.1
甘孜	I	0.02	0.3	0.35	0.1
凉山	I	0.06	0.3	0.35	0.1

2 结果与分析

2.1 产生负荷

四川省 2012 年农业非点源 TN, TP 产生负荷分别为 2 335 582, 507 269 t(图 2)。农业用地 TN, TP 产生负荷分别为 1 492 652, 342 964 t, 分别占四川省产生总负荷的 63.91%, 67.61%。农业用地是四川省农业非点源污染产生阶段的主要污染源。具体到各地区, 南充 TN, TP 产生负荷最大, 分别占四川省产生总负荷的 9.23%, 8.91%。达州 TN 产生负荷排第 2 位, 绵阳 TP 产生负荷排第 2 位。

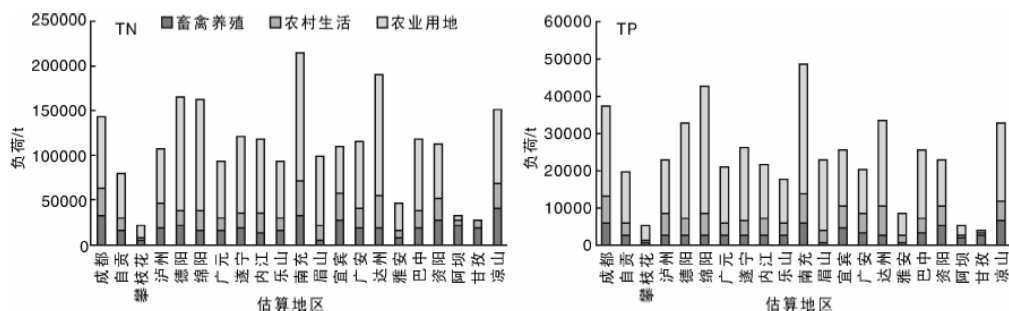


图 2 四川省 2012 年农业非点源 TN, TP 产生负荷

单位耕地面积上的污染负荷量, 即污染负荷强度, 能够消除面积对负荷总量的影响, 是污染分析的重要指标^[45]。采用系统聚类分析方法对四川省 21 个地区 TN, TP 产生负荷强度的相似程度进行分析。根据图 3 上方 0—25 标尺(反映各点位类别的亲疏距离)中点位 5 对应竖线可将 21 个地区划分为 5 类: 第 I 类包括遂宁、巴中、雅安和德阳; 第 II 类包括广安、南充和内江; 第 III 类包括泸州、攀枝花、阿坝、广元、自贡、绵阳、眉山、乐山和达州; 第 IV 类包括成都、资阳、凉山和宜宾; 第 V 类为甘孜。农业非点源 TN, TP 产生负荷强度随着级别增加而逐级降低, 遂宁、巴中、雅安和德阳农业非点源 TN, TP 产生负荷强度较高, 而甘孜产生负荷强度最低。

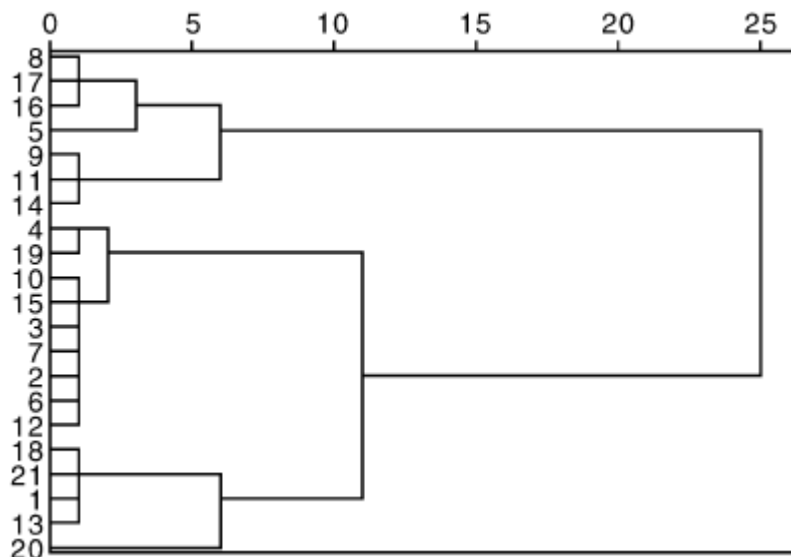


图 3 四川省各地区农业非点源产生负荷强度聚类树形图

1, 成都; 2, 自贡; 3, 攀枝花; 4, 泸州; 5, 德阳; 6, 绵阳; 7, 广元; 8, 遂宁; 9, 内江; 10, 乐山; 11, 南充; 12, 眉山; 13, 宜宾; 14, 广安; 15, 达州; 16, 雅安; 17, 巴中; 18, 资阳; 19, 阿坝; 20, 甘孜; 21, 凉山。

图4给出了四川省2012年农业非点源TN, TP流失负荷, 分别为308 545, 54 195 t, 流失系数分别为0.132 1, 0.106 8。从污染来源来看, 畜禽养殖TN, TP流失负荷分别为169 303, 23 738 t, 分别占总流失负荷的54.87%, 43.80%, 流失阶段平均流失系数分别为0.401 3, 0.324 4。农村生活TN, TP流失负荷分别为120 675, 26 298 t, 分别占总流失负荷的39.11%, 48.52%, 流失阶段平均流失系数分别为0.286 6, 0.288 6。在流失阶段, 畜禽养殖和农村生活是四川省农业非点源TN, TP的主要污染源。该结果与产生阶段相反, 主要原因在于, 农业用地TN, TP平均流失系数分别为0.012 4, 0.012 1, 远小于畜禽养殖和农村生活的流失系数。具体到各地区, 仍以南充TN, TP流失负荷最大, 凉山次之。

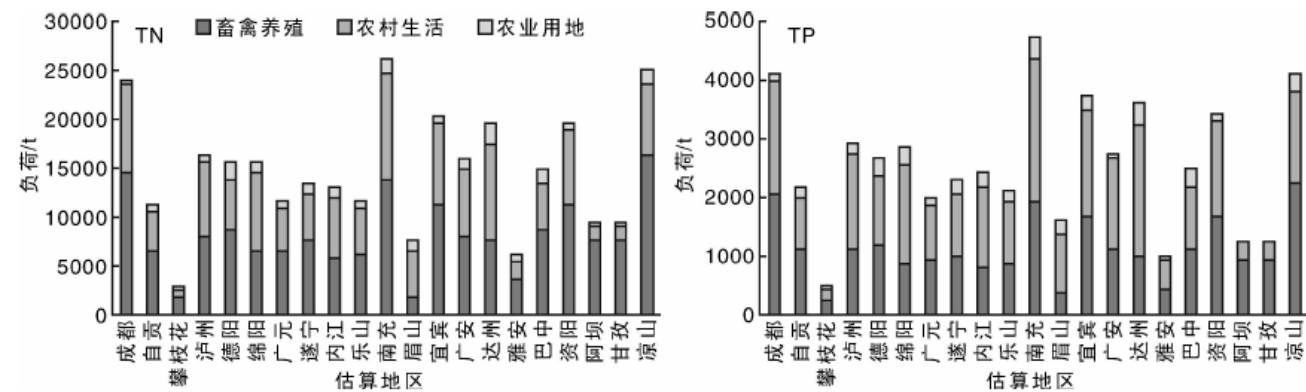


图4 四川省2012年农业非点源TN, TP流失负荷

农业非点源污染物流失负荷对环境的影响程度可以通过污染物的单位耕地面积流失负荷强度来反映^[46, 47]。将四川省21个地区的单位面积流失负荷强度平均划分为5个等级, 在GIS软件的支持下, 可得到四川省2012年农业非点源TN, TP单位耕地面积流失负荷强度空间分布特点(图5)。阿坝农业非点源TN, TP单位耕地面积流失负荷强度最大, 分别为15 304和2 040 $\text{kg} \cdot \text{km}^{-2}$, 主要原因在于阿坝畜禽养殖产业发达, 耕地面积较小。图5中, 单位面积流失负荷强度最小的地区是眉山, 其TN, TP的单位耕地面积流失负荷分别为4 402和946 $\text{kg} \cdot \text{km}^{-2}$ 。从空间分布来看, 四川省西部地区单位耕地面积流失负荷强度较大, 主要是因为西部地区地形复杂, 主要发展畜禽养殖业, 而东部地区地形较平坦, 种植业相对较发达。

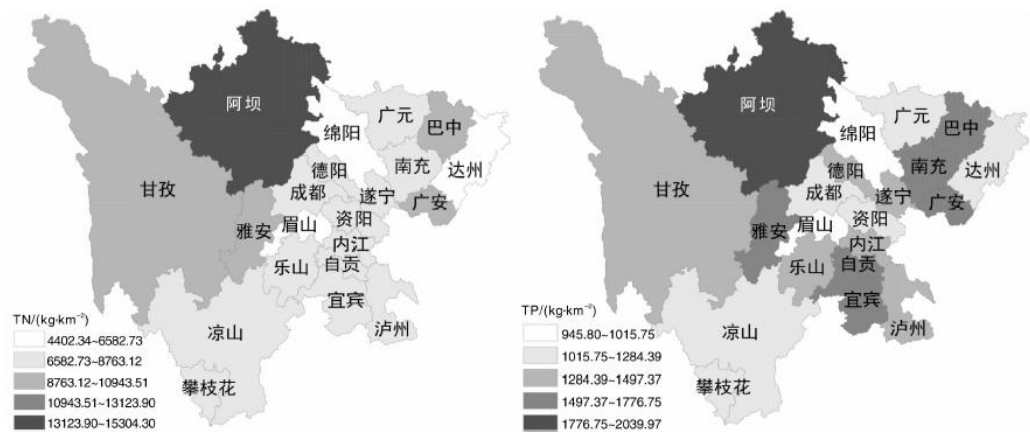


图5 四川省2012年TN, TP流失负荷强度空间分布

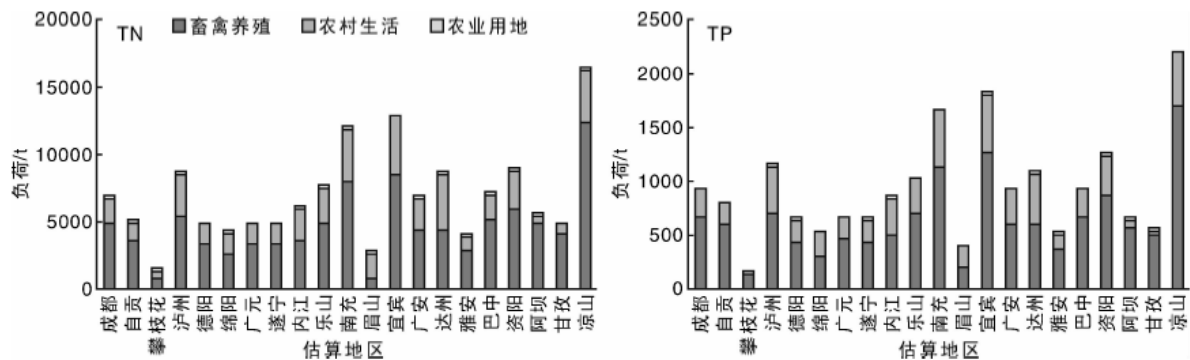


图 6 四川省 2012 年农业非点源 TN，TP 入河负荷

2.3 入河负荷

四川省 2012 年农业非点源 TN，TP 入河负荷分别为 142 938 和 19 698 t(图 6)，平均入河系数分别为 0.463 3，0.363 4。从污染来源看，畜禽养殖 TN，TP 入河负荷分别为 97 087，13 620 t，分别占总入河负荷的 67.92%，69.14%，是水体污染的主要污染源。具体到各地区，凉山的入河负荷最大，TN，TP 分别占四川省总入河负荷的 11.43%，11.36%。

农业非点源污染对地表水水体的污染程度可以通过敏感性指标来反映^[48]。单项水质指数法是一种常用的敏感性评价方法，即将污染物排放浓度与 GB 3838—2002《地表水环境质量标准》中Ⅲ类标准的比值进行评价。污染物排放浓度由各地区入河负荷量除以地表水资源量确定。研究中将敏感性分为 5 个等级^[48]。四川省各地区水质指数及敏感性等级见表 6。总体来看，四川省农业非点源 TN，TP 的水质指数分别为 0.49，0.34，敏感性级别均为不敏感，污染风险小。但要注意的是，四川省接近一半的区域地表水已超过Ⅲ类水质标准，敏感级别为轻度污染。其中，以遂宁污染最为严重，TN，TP 水质指数分别达 4.34 和 2.87，TP 敏感级别为中度敏感，污染风险较大。

表 6 四川省各地区水质指数及敏感性等级

地区	TN		TP	
	水质指数	敏感级别	水质指数	敏感级别
成都	0.74	不敏感	0.51	不敏感
自贡	1.9	轻度敏感	1.54	轻度敏感
攀枝花	0.25	不敏感	0.18	不敏感
泸州	1.39	轻度敏感	0.94	不敏感
德阳	1.53	轻度敏感	1.04	轻度敏感
绵阳	0.36	不敏感	0.24	不敏感

广元	0.67	不敏感	0.46	不敏感
遂宁	4.34	轻度敏感	2.87	中度敏感
内江	2.72	轻度敏感	1.91	轻度敏感
乐山	0.46	不敏感	0.33	不敏感
南充	2.31	轻度敏感	1.62	轻度敏感
眉山	0.34	不敏感	0.28	不敏感
宜宾	1.19	轻度敏感	0.87	不敏感
广安	1.78	轻度敏感	1.22	轻度敏感
达州	0.64	不敏感	0.42	不敏感
雅安	0.18	不敏感	0.12	不敏感
巴中	0.7	不敏感	0.46	不敏感
资阳	3.06	轻度敏感	2.17	轻度敏感
阿坝	0.14	不敏感	0.08	不敏感
甘孜	0.07	不敏感	0.04	不敏感
凉山	0.38	不敏感	0.26	不敏感
全省	0.49	不敏感	0.34	不敏感

3 讨论

目前，将输出系数模型用于农业非点源污染负荷估算的研究多集中于流失或入河单一阶段的负荷估算。在本研究区域内，黎万凤^[49]利用输出系数模型估算了嘉陵江流域非点源氮、磷污染流失负荷，结果表明，嘉陵江流域四川范围内非点源 TN、TP 流失阶段的主要污染源是畜禽养殖，本研究的结果与此一致；丁晓雯等^[45]对涪江流域农业非点源污染进行研究，结果显示，德阳和遂宁 2010 年农业非点源 TN 流失负荷分别为 19 700 和 18 400 t，本研究中德阳和遂宁 2012 年农业非点源 TN 流失负荷分别为 15 393 和 13 394 t，两者结果较为接近。杨立梦等^[50]利用输出系数模型对四川省乐山市茫溪河流域入河负荷进行估算，并对其特征进行分析，结果表明，畜禽养殖是入河负荷的主要来源，其次是农村生活，本研究中乐山地区研究结果与此相同。以上分析表明，本研究结果具有一定的可信度。然而，由于部分产生、流失和入河系数源于其他地区的类似研究，加之本研究对单位面积各类型农业用地肥料施入量的 TN 或 TP 含量进行了均值化处理，本结果可能与真实情况尚存在一定偏差。今后，在相关数据的支撑下，基于本研究方法所得出的结果将会更加准确。

Wang 等^[51]研究认为农业非点源对水环境的污染要经历一定阶段。刘之杰等^[18]和马强等^[52]研究指出, 控制农业活动中污染物的产生和运移是防治农业非点源污染最有效的途径。分阶段对农业非点源污染负荷进行估算是农业非点源污染控源、截留, 以及修复污染水体的基础。本研究基于输出系数模型, 从产生、流失、入河 3 阶段分别建立了污染物负荷估算模型, 并对四川省 2012 年农业非点源 TN, TP 的 3 阶段负荷进行了估算与评价, 取得了较为满意的结果, 表明本研究所建立的模型可明确农业非点源污染各阶段主要污染源及污染区域, 研究结果可为分阶段污染控制提供理论依据。

本研究表明, 农业用地是四川省农业非点源污染产生阶段的主要污染源, TN 和 TP 分别占产生总负荷的 63.91%, 67.61%。遂宁、巴中、雅安和德阳农业非点源 TN, TP 产生负荷强度较高, 应作为污染源头管理和治理的主要区域。该区域可采取科学灌溉、科学施肥、水土保持耕作及生态农业等方式进行污染控制^[53], 也可通过合理规划畜禽养殖布局、加强畜禽养殖场污染治理、实行种养结合等方式进行控制^[54]。流失阶段和入河阶段, 畜禽养殖是主要污染源。阿坝农业非点源 TN, TP 流失负荷强度最大。该区域可采用树篱、植被缓冲带、人工湿地、人工多水塘系统等技术进行控制, 以降低或预防农业非点源污染物对外界水体的影响^[52, 55]。对于河流污染情况, 总体上看四川省农业非点源 TN, TP 敏感性级别均为不敏感, 污染风险小。然而, 具体到各地区, 接近一半的区域已超过地表水Ⅲ类水质标准, 敏感级别为轻度污染。其中遂宁污染最为严重, TP 敏感级别为中度敏感, 污染风险较大。受污染水体地区可通过污水利用、前置库、污染修复等技术进行修复^[53]。

参考文献:

- [1] WANG S D, ZHANG L F, ZHANG X, et al. Coupling remote sensing data and eco-hydrological model to evaluate non-point source pollution risk for water resource management[J]. World Journal of Engineering, 2014, 11(2): 157.
- [2] 中华人民共和国环境保护部. 第一次全国污染源普查公报 [EB/OL]. (2010-02-11) [2014-09-20]. http://www.stats.gov.cn/tjsj/tjgb/qttjgb/qgqttjgb/201002/t20100211_30641.html.
- [3] 耿润哲, 王晓燕, 焦帅, 等. 密云水库流域非点源污染负荷估算及特征分析[J]. 环境科学学报, 2013, 33(5): 1484-1492.
- [4] 王慧亮, 孙志琢, 李叙勇, 等. 非点源污染负荷模型的比较与选择[J]. 环境科学与技术, 2013, 36(5): 176-182.
- [5] 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.
- [6] LIU Z, TONG S T Y. Using HSPF to model the hydrologic and water quality impacts of riparian land -use change in a small watershed[J]. Journal of Environmental Informatics, 2011, 17(1): 1-14.
- [7] CHO J, PARK S, IM S. Evaluation of agricultural nonpoint source (AGNPS) model for small watersheds in Korea applying irregular cell delineation[J]. Agricultural Water Management, 2008, 95(4): 400-408.
- [8] YANG S, DONG G, ZHENG D, et al. Coupling Xinanjiang model and SWAT to simulate agricultural non-point source pollution in Songtao watershed of Hainan, China[J]. Ecological Modelling, 2011, 222(20): 3701-3717.
- [9] CHEN H Y, TENG Y G, WANG J S. Load estimation and source apportionment of nonpoint source nitrogen and phosphorus based on integrated application of SLURP model, ECM, and RUSLE: a case study in the Jinjiang River, China[J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2013, 185(2): 2009-2021.

-
- [10] 周亮, 徐建刚, 孙东琪, 等. 淮河流域农业非点源污染空间特征解析及分类控制[J]. 环境科学, 2013, 34(2): 547-554.
- [11] 郝芳华, 杨胜天, 程红光, 等. 大尺度区域非点源污染负荷计算方法[J]. 环境科学学报, 2006, 26(3): 375-383.
- [12] WU L, GAO J, MA X, et al. Application of modified export coefficient method on the load estimation of non-point source nitrogen and phosphorus pollution of soil and water loss in semiarid regions[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2015, 22: 1-14.
- [13] 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.
- [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.
- [15] 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.
- [16] 丁晓雯, 刘瑞民, 沈珍瑶. 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(自然科学版), 2006, 42(5): 534-538.
- [17] DING X, SHEN Z, HONG Q, et al. Development and test of the export coefficient model in the upper reach of the Yangtze River[J]. Journal of Hydrology, 2010, 383(3): 233-244.
- [18] 刘之杰, 路竞华, 方皓, 等. 非点源污染的类型、特征、来源及控制技术[J]. 安徽农学通报, 2009, 15(5): 98-101.
- [19] 四川省人民政府. 四川农村年鉴[M]. 成都: 电子科技大学出版社, 2013.
- [20] 四川统计局. 四川统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2013.
- [21] 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.
- [22] 李海霞. 基于农地可持续利用视角下的农户化肥使用行为研究[D]. 雅安: 四川农业大学, 2009.
- [23] 国务院第一次全国污染源普查领导小组. 第一次全国污染源普查畜禽养殖业源产污排污系数手册[M]. 北京: 中国农业科学院农业环境与可持续发展研究所, 2009.
- [24] 张心如, 黄柏森, 杜干英, 等. 成都市畜禽养殖污染调查与防控措施[J]. 家畜生态学报, 2012, 32(6): 108-115.
- [25] 王方浩, 马文奇, 窦争霞, 等. 中国畜禽粪便产生量估算及环境效应[J]. 中国环境科学, 2006, 26(5): 614-617.
- [26] 吕俊. 基于 GIS 的杭州市水环境容量计算及总量分配系统研制[D]. 南京: 河海大学, 2007.

-
- [27] 马奇涛, 王宝庆. 天津滨海新区非点源污染负荷量估算[J]. 安全与环境学报, 2011, 11(2): 142-147.
- [28] 姚静, 李小建. 欠发达农区外出务工规模及影响因素分析[J]. 地理科学进展, 2008, 27(4): 89-95.
- [29] 朱梅. 海河流域农业非点源污染负荷估算与评价研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2011.
- [30] 曾秀莉, 刘丹, 韩智勇, 等. 成都市典型地区农村生活垃圾调查及处理模式探讨[J]. 广东农业科学, 2012, 39(18): 211-214.
- [31] 冯庆, 王晓燕, 王连荣. 水源保护区农村生活污染排放特征研究[J]. 安徽农业科学, 2009, 37(24): 11681-11685.
- [32] 王卫平. 九龙江流域水环境容量变化模拟及污染物总量控制措施研究[D]. 厦门: 厦门大学, 2007.
- [33] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 西南地区农村生活污水处理技术指南(试行)[M]. 北京: 中国科学院生态环境研究中心, 2010.
- [34] 张大弟, 章家骥. 上海市郊区非点源污染综合调查评价[J]. 上海农业学报, 1997, 13(1): 31-36.
- [35] 钱秀红, 徐建民. 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.
- [36] 邹建伟. 军山湖流域农业非点源入湖负荷估算及评价[D]. 南昌: 南昌大学, 2012.
- [37] 第一次全国污染源普查领导小组办公室. 第一次全国污染源普查农业污染源肥料流失系数手册[EB/OL]. (2009-02-28) [2014-09-30]. <http://www.docin.com/p-307757881.html>.
- [38] 全国环境规划院. 全国水环境容量核定技术指南[EB/OL]. (2003-09-28) [2014-09-30]. <http://www.docin.com/p-119849532.html>.
- [39] 陈闯, 邓良伟, 陈子爱, 等. 四川省农村垃圾与污水处理现状调研与分析[J]. 中国沼气, 2012, 30(1): 42-46.
- [40] 中国环境规划院. 全国地表水环境容量核定工作常见问题辨析[EB/OL]. (2011-02-26) [2014-09-30]. <http://wenku.baidu.com/link?url=a4yLKjkBg6oADLJQYgP8v-10HHOr7PAf0d5jcFiReZsYX6oCF6r5sDWKuTj8mG7JwaH8-0q163u11aHcxXRN4Gu6Sw42HHvrIZNnq6dxEQXS>.
- [41] 王洋, 曾强, 刘洪亮, 等. 天津市农村地区垃圾与污水现状调查与对策研究[J]. 现代预防医学, 2008, 35(19): 3687-3689.
- [42] 孙瑞敏. 我国农村生活污水排水现状分析[J]. 能源与环境, 2010 (5): 33-34.
- [43] 石峰, 范立建, 吕实波, 等. 2006 年山东省农村垃圾和污水处理状况调查[J]. 预防医学论坛, 2008, 14(9): 774-775.

-
- [44] 张利民, 刘伟京, 尤本胜, 等. 太湖流域漕桥河污染物来源特征[J]. 环境科学研究, 2009, 22(10): 1150-1155.
- [45] 丁晓雯, 沈珍瑶. 涪江流域农业非点源污染空间分布及污染源识别[J]. 环境科学, 2012, 33(11): 4025-4032.
- [46] SHEN Z Y, HONG Q, CHU Z, et al. A framework for priority non-point source area identification and load estimation integrated with APPI and PLOAD model in Fujiang Watershed, China[J]. Agricultural Water Management, 2011, 98(6): 977-989.
- [47] MOSLEY L M, FLEMING N. Pollutant loads returned to the lower murray river from flood-irrigated agriculture[J]. Water, Air & Soil Pollution, 2010, 211(1): 475-487.
- [48] 孙勤芳, 段华平, 赵建波, 等. 基于清单分析的农业非点源污染控制区划方法[J]. 生态与农村环境学报, 2011, 27(4): 104-109.
- [49] 黎万凤. 嘉陵江流域非点源污染负荷的预测分析[D]. 重庆: 重庆大学, 2009.
- [50] 杨立梦, 付永胜, 高红涛. 四川省茫溪河流域非点源污染负荷研究[J]. 重庆理工大学学报(自然科学版), 2014, (11): 57-63.
- [51] WANG J C, WU Y Q, HU A Y, et al. Application and establishment model of non-point source pollution based on statistical data[C]. Xi'an: 2011 International Symposium on Water Resource and Environmental Protection (ISWREP), 2011: 854-858.
- [52] 马强, 马红娟, 唐华, 等. 农业非点源污染与防控研究进展[J]. 现代农业科技, 2015 (1): 200-204.
- [53] 郭鸿鹏, 朱静雅, 杨印生. 农业非点源污染防治技术的研究现状及进展[J]. 农业工程学报, 2008, 24(4): 290-295.
- [54] 吴岩, 杜立宇, 高明和, 等. 农业面源污染现状及其防治措施[J]. 农业环境与发展, 2011, 28(1): 64-67.
- [55] 胡心亮, 夏品华, 胡继伟, 等. 农业面源污染现状及防治对策[J]. 贵州农业科学, 2011, 39(6): 211-215.