

# 涪江流域(射洪境内)面源污染综合评价

史小春<sup>1</sup>, 敖天其<sup>1,2</sup>, 黎小东<sup>1</sup>, 王文章<sup>1</sup>, 杨雯<sup>1</sup>

(1. 四川大学 水利水电学院, 成都 610065; 2. 四川大学 水力学与山区河流开发保护国家重点实验室, 成都 610065)

**摘要:**为准确评估射洪县水体环境主要污染源和主要污染物, 以为当地水环境污染控制提供理论依据。利用源强系数法和输出系数法, 从涪江流域射洪县 30 个乡镇、6 种污染源角度分析了农村面源污染物的入河量, 并通过等标污染负荷法计算了各乡镇的负荷比。结果表明: 整个研究区的主要污染物为总氮, 其入河量为 1 443.9 t; 太和镇的主要污染源为工业污染, 所占污染比例为 63.3%, 其他乡镇的主要污染源均为农村居民生活污染, 所占比例均高于 50%; 30 个乡镇中有 8 个乡镇的总等标污染负荷量超过 100 t, 可见研究区内面源污染严重, 主要为农村居民生活污染源, 污染物入河量在空间分布上差异较大, 需根据不同污染物的贡献程度有针对性地采取防治措施。

**关键词:**涪江流域; 面源污染; 等标污染负荷法; 总氮

中图分类号: X52

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2018)04-0375-05

## Comprehensive Evaluation on the Non-Point Source Pollution of Fujiang Basin (Shehong Territory)

SHI Xiaochun<sup>1</sup>, AO Tianqi<sup>1,2</sup>, LI Xiaodong<sup>1</sup>, WANG Wenzhang<sup>1</sup>, YANG Wen<sup>1</sup>

(1. College of Water Resources & Hydropower, Sichuan University, Chengdu 610065, China;

2. State Key Laboratory of Hydraulics and Mountain River Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

**Abstract:** In order to accurately assess the main sources of pollution and major pollutants of water environment in Shehong County, and provide a theoretical basis for the local water environment pollution control. We used the source strength coefficient method and the output coefficient method to analyze the river pollution load of pollutants of the rural non-point source pollution from the 6 kinds pollution sources and the 30 towns, which in Fujiang Basin (shehong territory). The equivalent pollution load method was adopted to account the load ratio of every town. The results show that the main pollutant in the study area is total nitrogen which is 1 443.9 tons; the main pollution source of Taihe Town is the industrial pollution, and the proportion of pollution accounted for 63.3%, the main pollution sources in other towns are rural residents living pollution, and the proportion is more than 50%; among the 30 towns, the total standard pollution load of 8 towns is greater than 100 tons. It can be seen that the non-point source pollution in the study area is serious; the main source of pollution is the pollution of rural residents. Appropriate control measures should be taken according to the distribution of non-point source pollution due to their significant different spatial distribution and the contributions of different pollutants.

**Keywords:** Fujiang Basin; non-point source pollution; equivalent pollution load method; total nitrogen

环境污染分为点源污染与非点源污染, 点源污染指有固定排放点的污染源, 而非点源污染则没有固定的污染排放点, 是指溶解的或固体污染物从非特定的地点, 在降水和径流冲刷作用下, 通过径流过程而汇

入受纳水体(如河流、湖泊、水库、海湾等), 引起的水体污染<sup>[1]</sup>。近年来, 我国城镇化建设和农业产业化进程地加快引起农业生产中使用化肥、农药及畜禽粪便等造成的农业面源污染日益突出, 我国化肥使用量按

耕地面积计算已达 40 t/km<sup>2</sup>, 远超发达国家单位面积施用量安全上限, 但利用率仅为 30%。化肥农药的利用率较低、流失率较高, 不仅导致农田土壤污染, 还通过农田径流造成了对水体的有机污染、富营养化污染, 甚至地下水污染和空气污染, 农业面源污染日益严重。中华人民共和国农业部在《2017 年农业面源污染防治攻坚战重点工作安排》<sup>[2]</sup> 中提出紧紧围绕“一控两减三基本”目标, 重点打造省县两级农业面源污染防治示范体系。因此, 本文以射洪县为研究对象, 基于输出系数模型和源强系数法对研究区环境污染现状进行科学评估, 并采用等标污染负荷法核算各污染物的贡献程度。

## 1 研究区概况

研究区射洪县地处四川盆地中部、涪江中游, 地处北纬 30°38′10″—31°9′49″, 东经 105°10′21″—105°39′27″, 位于成渝经济区北弧中心, 属全省“一极一轴一区块”成都都市圈增长极, 幅员面积 1 496 km<sup>2</sup><sup>[3]</sup>。县境属嘉陵江支流涪江水系, 一级支流涪江, 射洪县境内河段长 88 km, 河床比降为 1‰ 左右, 至出县境内流域面积 24 139.3 km<sup>2</sup>。其中, 县境直接汇入涪江的径流面积为 1 254 km<sup>2</sup>, 沿岸新冲积平坝面积 90.9 km<sup>2</sup>, 其中耕地 0.39 万 hm<sup>2</sup>。射洪县内雨量较充沛, 水系发达, 溪河密布, 河网密度大, 有利于污染物向河流的排放, 是射洪县污染严重的一个重要原因。

## 2 研究方法

### 2.1 资料来源

本研究以乡镇为尺度, 研究区共 30 个乡镇, 其中太和镇是射洪县县城所在地。数据资料包括乡镇人口(农业与非农业)和面积、畜禽养殖情况、化肥施用量、土地坡度及土壤类型等。数据来源于射洪县环保局、射洪县国土局、射洪县农业局等单位及射洪县年鉴资料。

### 2.2 源强系数法

源强系数法由中国环境规划院于 2003 年在《水环境容量核定技术指南》中提出<sup>[4]</sup>, 广泛应用于国内的非点源污染源负荷的估算。根据《四川省地表水环境容量核定技术报告》规定, 标准农田源强系数为 COD: 150 kg/(hm<sup>2</sup>·a), 氨氮 30 kg/(hm<sup>2</sup>·a)。而所谓的标准农田指的是平原、种植作物为小麦、土壤类型为壤土、化肥施用量为 375~525 kg/(hm<sup>2</sup>·a)、降水量在 400~800 mm 范围内的农田。本研究所采用的源强系数适用于四川地区, 其中入河系数指每种污染源的污染物排放量中进入水体的比率<sup>[5]</sup>。详见表 1。

以农田地表径流为例, 其污染物排放量计算过程为:

$$L = \sum_{i=1}^n \alpha_i S_i P_i C_i F_i E_i \quad (1)$$

式中:  $L$  为农田地表径流的污染物排放量(t/a);  $\alpha_i$  为农田的坡度修正值;  $S_i$  为土壤修正系数, 根据不同质地取值;  $P_i$  为降雨量修改系数;  $C_i$  为农作物类型修正系数;  $F_i$  为土壤修正量;  $E_i$  为标准农田地表径流的源强系数。

表 1 各标准污染源的源强系数及其入河系数

项目	单位	COD	入河系数
农田地表径流	t/(hm <sup>2</sup> ·a)	0.149	0.1
畜禽(猪)	g/(头·d)	50	0.1
农村居民生活污水	g/(人·d)	40	0.1
城镇居民生活污水	g/(人·d)	40	0.1
建设用地	t/a	50	0.9
工业污染	t/a	—	0.9

### 2.3 输出系数法

输出系数法是 Johnes 和 O'sullivan 于 1989 年提出, 由于它的简单和相对稳定性而在许多国家被广泛应用。Johnes<sup>[5]</sup> 1990 年对输出系数法进行了修正, 修正后的模型考虑了一些新的营养输出因素, 包括作物的固氮作用、半自然植被和林地、人类聚居区的污水处理系统和化粪池系统以及会带来营养物输出增加的土地利用管理措施等。本研究采用了修正后的模型, 公式如下:

$$L = \sum_{i=1}^n E_i [A_i (I_i)] + p \quad (2)$$

式中:  $L$  为营养物的流失量;  $E_i$  为营养源  $i$  的输出系数;  $A_i$  为土地利用类型  $i$  的面积, 或畜禽养殖类型  $i$  的数量或流域的人口数量;  $I_i$  为对污染源  $i$  的输入量;  $p$  为来自降水的营养物输入。

输出系数决定了每种确定的污染源向水体排放营养物(TN 和 TP)的输出率, 系数主要来源有 3 个方面: 文献查询、试验结果和水文统计方法。3 种方法各有优缺点: (1) 文献法相对于另外两种方法简易、方便, 但准确度低, 精度不高, 具有局限性; (2) 试验方法准确度最高, 但获取过程投资较大, 需大量的投资和时间; (3) 水文统计法体现了营养物迁移的水文机理, 比文献法具有更高的准确性, 但是需要大量的水文和水质数据, 这在发展中国家的小流域很难获得。由于监测资料的短缺, 本研究主要采用文献法结合实地调查数据对输出系数进行确定。根据对长江上游地区大量面源污染研究文献的分析和调查数据<sup>[6-11]</sup>, 确定本研究的输出系数(表 2)。

### 2.4 等标污染负荷法

由于不同污染物的排放标准不同, 为了便于不同污染物进行比较, 引进等标污染负荷的概念以进行统一标准的转化。等标污染负荷法的主要思想是结合

不同污染物的排放标准,将不同污染源产生的不同污染物与其排放标准相比较,以获取统一尺度上可进行比对的量值<sup>[12]</sup>。该方法的计算公式为:

$$P_j=\sum P_{ij};\quad P_{ij}=\frac{G_{ij}}{S_i}$$

(4)

表 2 不同面源的综合输出系数

类型	旱地	水稻田	果园	天然林地	荒地	建设用地	居民生活污水	大牲口	猪	羊	家禽
TN	0.115	0.075	0.04	0.119	0.745	0.55	0.935	3.66	0.695	0.7	0.03
TP	0.00552	0.00564	0.003	0.009	0.0306	0.0144	0.1284	0.186	0.0852	0.027	0.003

总等标污染负荷:

$$P=\sum P_j$$

(5)

等标污染负荷比:

$$K_{ij}=\frac{P_{ij}}{P_i}\times 100\%$$

(6)

式中: $K_{ij}$ 为第  $j$  种污染物对于第  $i$  种污染源的污染负荷比。

3 结果与综合评价

据 2010 年《第一次全国污染源普查公告》统计<sup>[13]</sup>,我国农业污染源 COD,TN,TP 的排放量分别占全国排放总量的 43.7%,57.2%和 67.4%,农业面源污染已成为我国水环境污染、土壤污染和大气污染的重要部分,因此本文以 COD,TN,TP 共 3 种物质作为评价污染

式中: $P_j$  为第  $j$  种污染源在整个评价范围内的等标污染负荷 $[(t/a)/(mg/L)]$ ;  $P_{ij}$  为第  $j$  种污染源中第  $i$  种污染物的等标污染负荷 $[(t/a)/(mg/L)]$ ;  $G_{ij}$  为第  $j$  种污染源中第  $i$  种污染物的年排放量 $(t/a)$ ;  $S_i$  为第  $i$  种污染物的评价标准 $(mg/L)$ 。

物。采用《地表水环境质量标准》(GB3838—2002)中Ⅲ类水质标准,即 COD:20 mg/L,TP:0.2 mg/L,TN:1 mg/L 的标准,对研究区 30 个乡镇的 COD,TP,TN 这 3 种污染物进行评估,并从总等标污染负荷角度分析各乡镇主要入河污染源。

3.1 从污染源角度评估

农业面源污染指农业生产生活中,农田中的泥沙、农药及其他污染物在降水或径流过程中进入水体而形成的面源污染,这些污染物主要来源于农田施肥、农药、畜禽及水产养殖和农村居民生活<sup>[14]</sup>。因此,本文对射洪县境内的 6 种污染源,即农业面源、畜禽养殖、城镇生活污水、农村居民生活污染、工业污染和城镇地表径流 6 方面进行 3 种污染物的评估,其污染物入河量见表 3。

表 3 6 种污染源的入河量

t

项目	农业面源	畜禽养殖	城镇生活污水	农村居民生活	工业污染	城镇地表径流	合计
COD	1206.2	65.2	701.7	1026.2	452.5	6.6	3458.4
TN	253.3	95.8	68.4	657.4	184.1	184.9	1443.9
TP	13.2	5.3	9.5	90.3	0.7	4.0	123.0

由表 3 可知 3 种污染物的入河量,但环境所能容纳的 3 种污染物的排放标准有所不同,为方便比较各污染物对水环境的污染情况,因此引入等标污染的概念分析研究区 30 个乡镇的各种污染源的污染负荷情况,分别计算 30 个研究乡镇的 6 种污染源污染负荷量,其污染程度见图 1。

本文在分析了射洪县境内 6 种污染源的等标污染负荷分布情况的基础上,进一步研究各入河污染源对所在乡镇入河总等标污染负荷的贡献度,即污染负荷比,通过计算每种污染源的入河总等标污染负荷占所在镇入河总等标污染负荷的比值,得到该镇的主要污染源。具体情况见表 4。

如表 4 所示,30 个研究乡镇中,除太和镇以外,其他 29 个乡镇的主要污染源为农村居民生活污染,在 6 种污染源中所占比例都超过 50%。而太和镇则是以工业污染占主导地位,所占比例高达 63.3%。

3.2 从各污染物角度分析

研究区的污染物主要为 COD,TN,TP,通过源

强系数法和输出系数法计算出 30 个研究单元的各污染物入河量,并对乡镇污染物的入河量进行排序,具体数据见表 5。

研究区 30 个乡镇中,COD 入河总量贡献度较大的乡镇为太和镇,所占比例为 15.7%;大于镇所占比例 7.2%;沱牌镇所占比例 6.3%。TN 入河总量贡献度较大的乡镇为太和镇,所占比例 17.0%;沱牌镇所占比例为 5.8%;大于镇所占比例 5.3%。TP 入河总量贡献度较大的乡镇为大于镇,所占比例 6.3%;沱牌镇所占比例 6.0%;金华镇所占比例 5.6%。其中大于镇和沱牌镇的 3 种污染物入河量在研究乡镇的入河量中都居前 3 位。

在清楚研究区各乡镇的主要污染源基础上,通过计算 3 种污染物的等标污染负荷总量,分析各乡镇的主要污染物。在此基础上,计算各污染物在总等标污染负荷中的等标污染负荷比,分析主要污染物。具体数据见表 6。

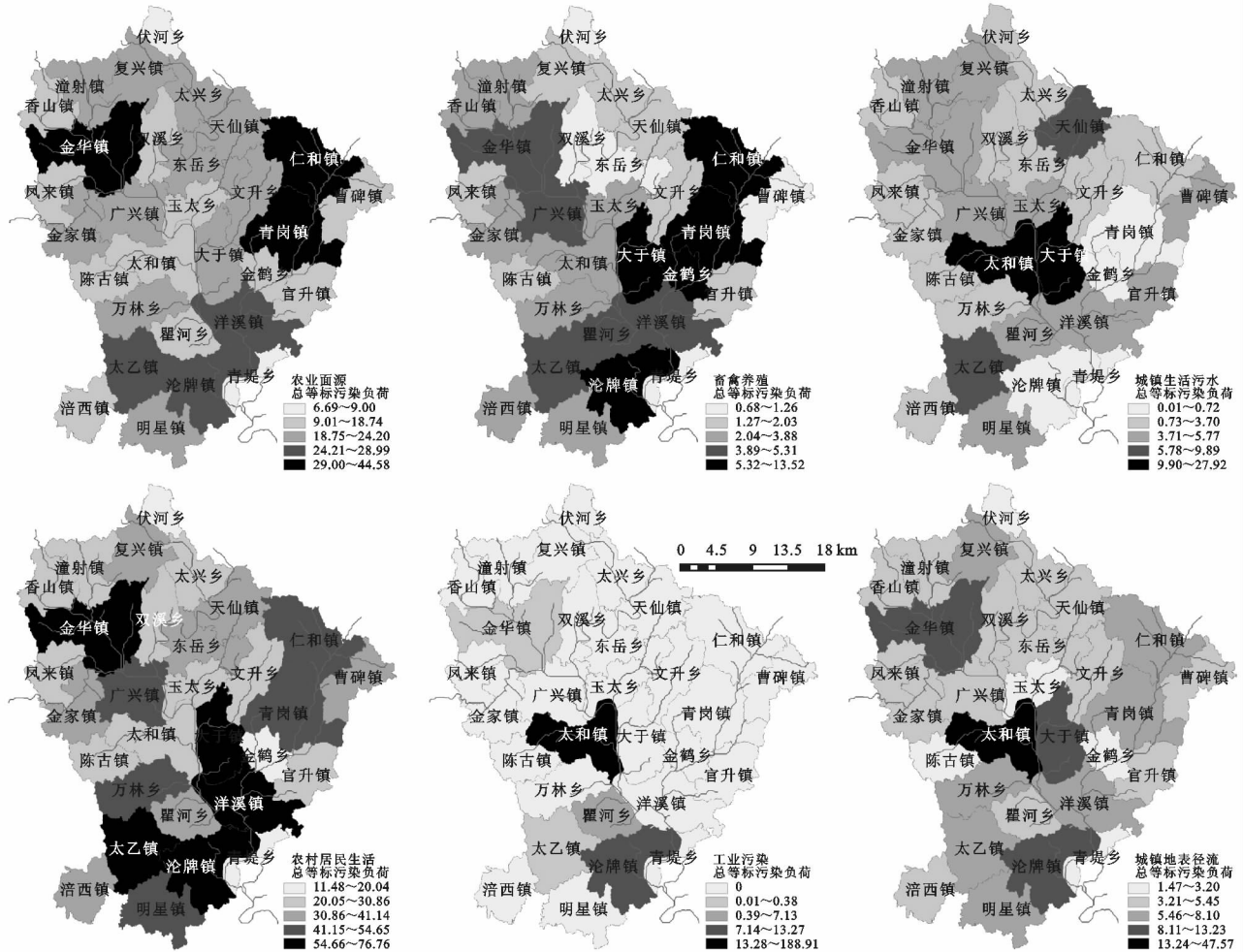


图 1 各污染源等标污染负荷

表 4 研究区各污染源的污染负荷比

乡镇	面源	畜禽	城镇生活	农村	工业	城镇地表	乡镇	面源	畜禽	城镇生活	农村	工业	城镇地表
	污染	养殖	污水	居民生活	污染	径流		污染	养殖	污水	居民生活	污染	径流
太和镇	3.8	1.0	7.5	8.4	63.3	15.9	陈古镇	20.5	3.5	3.8	65.4	0.0	6.8
大于镇	8.9	10.6	21.9	49.3	0.0	9.3	凤来镇	22.9	4.5	1.6	63.3	0.0	7.7
广兴镇	16.4	6.8	7.1	62.8	0.0	7.0	潼射镇	23.3	5.1	6.8	55.3	0.0	9.6
金华镇	20.9	4.5	3.9	60.3	0.3	10.0	曹碑镇	21.4	2.3	5.0	62.9	0.0	8.5
沱牌镇	12.1	9.0	0.1	58.6	10.1	10.1	官升镇	24.0	3.3	0.1	64.6	0.0	8.0
太乙镇	16.3	5.0	9.4	61.7	0.4	7.2	瞿河乡	13.9	7.6	6.8	54.8	10.3	6.7
金家镇	18.6	4.5	11.1	58.8	0.0	7.1	伏河乡	23.2	3.1	15.8	49.6	0.0	8.4
复兴镇	23.1	3.1	4.6	59.4	0.0	9.7	青堤乡	13.5	4.4	19.5	56.7	0.0	5.9
天仙镇	25.0	3.1	0.1	62.4	0.0	9.4	双溪乡	25.9	1.7	8.7	55.7	0.0	8.1
仁和镇	21.1	10.9	5.2	55.3	0.0	7.5	文升乡	23.6	3.6	11.1	54.7	0.0	7.1
青岗镇	22.1	12.8	3.2	54.0	0.0	7.9	万林乡	19.8	5.4	3.6	62.9	0.0	8.2
洋溪镇	16.2	5.2	2.7	67.6	0.0	8.2	太兴乡	26.8	3.2	10.0	52.0	0.0	8.0
香山镇	17.7	6.0	9.2	58.2	0.0	9.0	东岳乡	23.3	2.2	3.7	62.3	0.0	8.5
明星镇	19.5	3.9	5.6	63.1	0.0	8.0	金鹤乡	18.8	22.2	6.5	47.6	0.0	5.2
涪西镇	19.3	4.2	9.8	60.1	0.0	6.6	玉太乡	22.8	8.8	2.2	58.6	0.0	7.6

利用 COD:20 mg/L,TP:0.2 mg/L,TN:1 mg/L 的排放标准计算 COD,TN,TP 这 3 种污染物的等标负荷量及总等标污染负荷,结果如表 5—6 所示,该研究

区 30 个乡镇的主要污染物皆为 TN,太和镇、大于镇、金华镇、沱牌镇、太乙镇、仁和镇、青岗镇和洋溪镇的总等标污染负荷量为 3 位数。

表 5 研究区各乡镇污染物入河量 t						
乡镇	污染物入河量					
	COD	排序	TN	排序	TP	排序
太和镇	542.9	1	245.4	1	5.2	8
大于镇	249.3	2	76.1	3	7.8	1
广兴镇	120.5	9	47.6	9	5.0	9
金华镇	161.5	5	71.0	4	6.9	3
沱牌镇	218.1	3	83.3	2	7.4	2
太乙镇	177.0	4	63.2	5	6.6	4
金家镇	120.9	18	42.2	13	4.3	12
复兴镇	92.2	19	36.9	14	3.5	16
天仙镇	75.0	10	34.6	17	3.3	18
仁和镇	150.9	7	61.8	7	5.9	6
青岗镇	131.7	11	62.3	6	5.8	7
洋溪镇	135.6	6	60.6	8	6.3	5
香山镇	80.2	26	30.1	21	3.0	21
明星镇	121.2	12	46.1	10	4.7	10
涪西镇	102.5	15	34.9	16	3.6	14
陈古镇	68.6	20	28.9	24	3.0	22
凤来镇	64.4	25	28.2	25	2.8	24
潼射镇	81.9	23	34.0	18	3.2	20
曹碑镇	88.8	14	33.1	19	3.3	17
官升镇	64.3	16	29.0	23	2.9	23
瞿河乡	118.7	8	44.0	12	3.9	13
伏河乡	26.9	29	14.6	30	1.5	30
青堤乡	24.8	30	15.1	29	1.7	29
双溪乡	51.0	27	26.4	27	2.6	26
文升乡	70.6	17	32.5	20	3.2	19
万林乡	89.1	13	45.1	11	4.5	11
太兴乡	66.6	24	29.4	22	2.8	25
东岳乡	73.3	21	35.6	15	3.5	15
金鹤乡	46.9	28	27.3	26	2.5	27
玉太乡	43.3	22	24.1	28	2.6	28
合计	3458.4		1443.9		123.0	

4 结 论

(1) 涪江流域射洪县境内的 6 种污染源的 COD 入河总量为 3 458.4 t,前 3 位依次为太和镇、大于镇、沱牌镇。TN 入河总量为 1 443.9 t,前 3 位依次为太和镇、沱牌镇、大于镇。TP 入河总量为 123.0 t,前 3 位依次为大于镇、沱牌镇、金华镇;

(2) 利用等标污染负荷法得出研究区内太和镇的主要污染源为工业污染,其余乡镇的主要污染源均为农村居民生活污染;

(3) 研究区 30 个乡镇的主要污染物皆为 TN,其次,30 个乡镇中有 8 个乡镇的总等标污染负荷量超 3 位数,总等标污染负荷量最高达 303.3 t。

参考文献:

[1] Olness A. Water quality: prevention, identification, and man-

表 6 研究区各乡镇主要入河污染物 t					
乡镇名	COD 等标 负荷总量	TN 等标 负荷总量	TP 等标 负荷总量	总等标 污染负荷	主要 污染物
太和镇	27.2	250.0	26.1	303.3	TN
大于镇	12.5	86.8	38.8	138.1	TN
广兴镇	6.0	58.9	24.7	89.6	TN
金华镇	8.1	91.9	34.4	134.4	TN
沱牌镇	11.0	96.4	36.9	144.3	TN
太乙镇	8.9	73.0	32.7	114.6	TN
金家镇	4.0	49.6	20.9	74.5	TN
复兴镇	3.7	48.0	18.8	70.5	TN
天仙镇	5.9	47.3	18.9	72.1	TN
仁和镇	6.8	74.7	28.8	110.3	TN
青岗镇	5.7	75.9	27.9	109.5	TN
洋溪镇	7.7	73.6	31.9	113.2	TN
香山镇	2.8	36.8	15.1	54.7	TN
明星镇	5.4	55.0	24.3	84.7	TN
涪西镇	4.4	39.6	17.3	61.3	TN
陈古镇	3.7	35.4	15.2	54.3	TN
凤来镇	3.0	35.8	14.8	53.6	TN
潼射镇	3.4	44.5	16.8	64.7	TN
曹碑镇	4.8	40.5	17.2	62.5	TN
官升镇	4.4	37.1	15.6	57.1	TN
瞿河乡	6.2	50.9	19.8	76.9	TN
伏河乡	1.8	16.8	6.3	24.9	TN
青堤乡	1.5	15.9	6.6	24.0	TN
双溪乡	2.6	33.4	12.4	48.4	TN
文升乡	4.1	39.7	15.2	59.0	TN
万林乡	5.3	53.6	22.3	81.2	TN
太兴乡	3.3	35.7	13.3	52.3	TN
东岳乡	3.7	44.7	17.7	66.1	TN
金鹤乡	2.2	31.3	11.4	44.9	TN
玉太乡	3.4	34.0	12.8	50.2	TN

注:加黑数字表示总等标污染负荷超过 100 t。

agement of diffuse pollution[J]. Geographical Journal, 1994, 162(1):383.

[2] 农业部. 农业部部署 2017 年农业面源污染防治攻坚战重点工作[J]. 中国农技推广, 2017(3):60.

[3] 郭春梅. 基于 RS 和 GIS 的射洪县土地利用变化与评价研究[D]. 成都:四川师范大学, 2012.

[4] 中国环境规划院. 全国水环境容量核定技术指南[R]. 北京:中国环境规划院, 2003.

[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 modelling approach[J]. Journal of Hydrology, 1996, 183(3/4):323-349.

[6] 张洪波,李俊,黎小东,等. 缺资料地区农村面源污染评估方法研究[J]. 四川大学学报:工程科学版, 2013, 45(6):58-66.

- [D]. 北京:中央民族大学,2005.
- [7] 马士龙. 植被覆盖对土壤风蚀影响机理的研究[D]. 北京:北京林业大学,2006.
- [8] 杨文斌,王涛,冯伟,等. 低覆盖度治沙的理论与沙漠科技进步[J]. 中国沙漠,2017,37(1):1-6.
- [9] Lancaster N, Bass A C W. Influence of vegetation cover on sand transport by wind: field studies at Owens Lake, California[J]. *Earth and Surface Processes and Landforms*, 1998(23):69-82.
- [10] 杜会石. 库布齐沙漠沙丘动态变化研究[D]. 北京:北京师范大学,2013.
- [11] 辛未冬. 松嫩沙地固定沙丘土壤动物群落特征及其在凋落物分解中的作用研究[D]. 长春:东北师范大学,2011.
- [12] 张森,陈健飞,龚建周. 面向对象分类的决策树方法探讨[J]. 测绘科学,2016,41(6):117-121.
- [13] Gutman G, Ignatov A. The derivation of the green vegetation fraction from NOAA/AVHRR data for use in numerical weather prediction models [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 1998,19(8):1533-1543.
- [14] Carlson T N, Ripley D A. On the relation between NDVI, fractional vegetation cover, and leaf area index [J]. *Remote Sensing of Environment*, 1997, 62(3): 241-252.
- [15] 温小乐,李洋,林征峰. 海岛建设引发的植被覆盖度变化的遥感分析[J]. 地球信息科学学报,2017,19(2): 273-280.
- [16] 白淑英,吴奇,史建桥,等. 基于时间序列遥感数据的西藏山南地区植被覆盖变化特征分析[J]. 中国沙漠, 2015,35(5):1396-1402.
- [17] 吴晶晶,田永中,许文轩,等. 基于 CA-Markov 模型的乌江下游地区土地利用变化情景分析[J]. 水土保持研究,2017,24(4):133-139.
- [18] 杨国清,刘耀林,吴志峰. 基于 CA-Markov 模型的土地利用格局变化研究[J]. 武汉大学学报:信息科学版, 2007,32(5):414-418.
- [19] 王涛,宋翔,颜长珍,等. 近 35 a 来中国北方土地沙漠化趋势的遥感分析[J]. 中国沙漠,2011,31(6):1351-1356.
- [20] 李振山,王怡,贺丽敏. 半干旱区植被风沙动力过程耦合研究: I. 模型[J]. 中国沙漠,2009,29(1):23-30.
- [21] 张萍,哈斯,杜会石,等. 抛物线形沙丘与油蒿灌丛之间的动态关系[J]. 科学通报,2011,56(35):3003-3010.
- [22] Yang T, Cao J, Wang Y, et al. Soil moisture influences vegetation distribution patterns in sand dunes of the Horqin Sandy Land, Northeast China[J]. *Ecological Engineering*, 2017,105:95-101.
- [23] 俞祥祥,李生字,马学喜,等. 沙漠公路防护林影响下近地表风沙流粒度特征的空间分异[J]. 水土保持研究, 2017,24(1):334-341.
- [24] Telfer M W, Hesse P P, Perez-Fernandez M, et al. Morphodynamics, boundary conditions and pattern evolution within a vegetated linear dunefield [J]. *Geomorphology*, 2017,290:85-100.
- [25] 董治宝,陈渭南,董光荣,等. 植被对风沙土风蚀作用的影响[J]. 环境科学学报,1996,16(4):437-443.
- [26] 钟卫,孔纪名,杨涛. 植被沙障对近地表风沙流特征影响的风洞试验[J]. 干旱区研究,2009,26(6):872-876.
- [27] 贺伟,布仁仓,熊在平,等. 1961—2005 年东北地区气温和降水变化趋势[J]. 生态学报,2013,33(2):519-531.
- [28] 孙凤华,杨素英,陈鹏狮. 东北地区近 44 年的气候暖干化趋势分析及可能影响[J]. 生态学杂志,2005,24(7): 751-755.
- [29] 郭坚,王涛,薛炯,等. 松嫩沙地荒漠化现状和原因[J]. 干旱区资源与环境,2007,21(5):101-105.

~~~~~  
(上接第 379 页)

- [7] 程艳,黎小东,敖天其. 古蔺河流域农村非点源污染综合评估[J]. 环境工程,2016(S1):114-118.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] 马广文,王业耀,香宝,等. 长江上游流域土地利用对面源污染影响及其差异[J]. 农业环境科学学报,2012,31 (4):791-797.
- [12] 陆珊,代俊峰,周作旺. 基于等标污染负荷法的生活和农业污染源分析[J]. 节水灌溉,2015(2):45-46.
- [13] 张蓉. 农用地利用方式与非点源污染控制政策研究 [D]. 杭州:浙江大学,2012.
- [14] 段玉杰,肖尚斌,黎国有. 我国农业面源污染现状及改善对策[J]. 环境保护与循环经济,2010,30(3):19-21.