

# 基于耕地承载力的畜禽养殖污染负荷及环境风险研究 ——以四川省为例

郭珊珊<sup>1</sup>, 张涵<sup>1</sup>, 杨汝馨<sup>2</sup>

(1. 西南交通大学 地球科学与环境工程学院, 四川, 成都 610000;  
2. 中国科学院 水利部 成都山地灾害与环境研究所, 四川, 成都 610041)

**摘要:** [目的] 通过对四川省畜禽养殖污染负荷、耕地承载力空间分布特征的探讨, 为研究区农业的可持续发展提供理论依据。[方法] 在前人研究基础上, 结合四川省区域特点, 研究各市州畜禽粪便产生量、主要污染物产生量、流失量以及单位耕地面积猪当量负荷量, N 和 P 负荷量, 利用 ArcGIS 解析其空间分布特征, 对耕地承载力现状进行风险评价。[结果] 2016 年四川省畜禽粪便总产量  $2.94 \times 10^7$  t; 产生和流失最多的污染物为化学需氧量(COD), 最少为全磷。四川省单位耕地面积猪当量负荷, N, P 负荷平均值分别为 50 310, 327, 85 kg/hm<sup>2</sup>, 平均负荷预警值 1.34, 风险评价等级 IV 级, 对环境有威胁。但负荷预警值在区内存在空间分布不均的特征, 阿坝州和甘孜州最高, 预警值分别为 6.61 和 6.93, 均属 VI 级, 对环境构成严重威胁。[结论] 现阶段畜禽粪便的产生已对四川省环境有威胁, 畜禽粪便污染的来源主要是牛粪和猪粪。应推广农牧结合、种养平衡、生态循环的畜禽养殖模式。

**关键词:** 畜禽养殖; 污染负荷; 面源污染; 耕地承载力; ArcGIS

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-288X(2019)01-0226-07

**中图分类号:** X53

**文献参数:** 郭珊珊, 张涵, 杨汝馨. 基于耕地承载力的畜禽养殖污染负荷及环境风险研究[J]. 水土保持通报, 2019, 39(1): 226-232. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2019.01.036; Guo Shanshan, Zhang Han, Yang Ruxin. Pollutant loads and environmental risks of livestock production based on arable land carrying capacity [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2019, 39(1): 226-232.

## Pollutant Loads and Environmental Risks of Livestock Production Based on Arable Land Carrying Capacity — A Case Study in Sichuan Province

Guo Shanshan<sup>1</sup>, Zhang Han<sup>1</sup>, Yang Ruxin<sup>2</sup>

(1. Faculty of Geosciences and Environmental Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu, Sichuan 610000, China; 2. Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences, Ministry of Water Resources, Chengdu, Sichuan 610041, China)

**Abstract:** [Objective] To investigate the pollution distribution of livestock production and the spatial distribution characteristics of arable land carrying capacity in Sichuan Province, in order to provide a theoretical basis for sustainable development of agriculture in this area. [Methods] Total livestock manure production, the losses of manure pollutants, and the availability of agricultural lands were estimated. The ArcGIS was used to evaluate land resource requirements and environmental risks of livestock production, as well as agricultural carrying capacity. [Results] Total livestock manure production in Sichuan Province was  $2.94 \times 10^7$  t in 2016. The losses of pollutants were dominated by COD (chemical oxygen demand, not a pollutant), while the least was total phosphorus (TP). The average PEL (pig equivalent load), nitrogen (N) and phosphorus (P) carrying capacity was 50 310, 327, and 85 kg/hm<sup>2</sup>, respectively, resulting in an average risk threshold value of 1.34 (grade IV). However, the load warning values varied greatly across the region, with the highest in Aba (6.61) and Ganzi (6.93). [Conclusion] At present, the production of livestock and

收稿日期: 2018-06-30

修回日期: 2018-08-23

资助项目: 国家自然科学基金项目“土地利用变化对地下水硝酸盐面源污染的影响研究: 以成都平原典型区域为例”(51509215); 成都市科技局惠民项目“区域空间施肥灌溉对农村地下水硝酸盐面源污染的效应研究”(2015HM0100350SF)

第一作者: 郭珊珊(1993—), 女(汉族), 河南省罗山县人, 硕士研究生, 研究方向为农业面源污染及防治。E-mail: shanshanguo9933@163.com。

通讯作者: 张涵(1980—), 女(汉族), 四川省成都市人, 副教授, 研究方向为农业面源污染和地下水污染防治研究。E-mail: zhanghan@home.swjtu.edu.cn。

poultry manure has been a threat to the environment in Sichuan Province, the source of livestock and poultry manure pollution is mainly cow dung and pig dung. The model of livestock and poultry breeding in the combination of agriculture and pastoral, breeding and ecological circulation should be promoted.

**Keywords:** livestock production; pollutants loads; non-point source pollution; arable land carrying capacity; ArcGIS

畜禽养殖污染是农业非点源污染的重要组成部分,据全国污染源普查数据,畜禽粪便中 COD, TN 和 TP 的产生量分别占农业污染源的 96%, 38% 和 65%<sup>[1]</sup>。目前,回田利用为畜禽粪便处理的主要有效手段,但当粪便产生量超过土壤承载力时,则会对土壤造成污染,因此有必要控制畜禽养殖数量和养殖密度,使粪便产生量不超过耕地最大承载能力。

目前,国内针对畜禽养殖引起的农业面源污染已开展了一些定量研究。王方浩等<sup>[2]</sup>和张绪美等<sup>[3]</sup>研究了中国畜禽养殖的污染产生量,并结合耕地面积估算全国农田耕地负荷量。杨飞等<sup>[4]</sup>对中国近 30 a 畜禽养殖量及其耕地氮污染负荷分析;刘晓利等<sup>[5]</sup>对中国各省不同养殖模式下生猪、奶牛、肉牛、肉鸡以及蛋鸡畜禽粪便氮构成进行相关分析;刘亚琼等<sup>[6]</sup>运用输出系数模型估算了北京市的需求养殖、土地利用等多种面源污染的污染负荷。王晓燕等<sup>[7]</sup>根据作物所需畜禽粪尿的最大量,估算北京密云县耕地畜禽粪便负荷并进行潜在环境风险评价。胡芸芸等<sup>[8]</sup>对沱江流域农业面源污染排放特征进行分析,探明了畜禽养殖是其首要污染来源,以及沱江农业面源污染重点防治区域。以上学者从畜禽粪便产生量、粪便污染物含量以及流失量等方面做了评估,但大部分研究为全国范围或集中在北方地区,针对西南地区畜禽养殖的污染分析相对偏少。

四川省位于长江中上游,区内山地、丘陵、平原和高原分别占全省面积 74.2%, 10.3%, 8.2% 和 7.3%,特别是高原和山地地区,农业是主要经济来源之一,畜禽养殖业占有很大比重。因此,本文拟以四川省为例,计算各市州的畜禽粪便产生量、主要污染物产生量和流失量,并利用 ArcGIS 分析污染物产生, N, P 负荷的空间分布,结合各市州的年末耕地面积,建立耕地承载力与畜禽养殖量之间的关系,进而探讨区内畜禽养殖对环境造成的威胁程度,为西南地区畜禽养殖业和农业可持续发展提供理论依据。

## 1 数据与方法

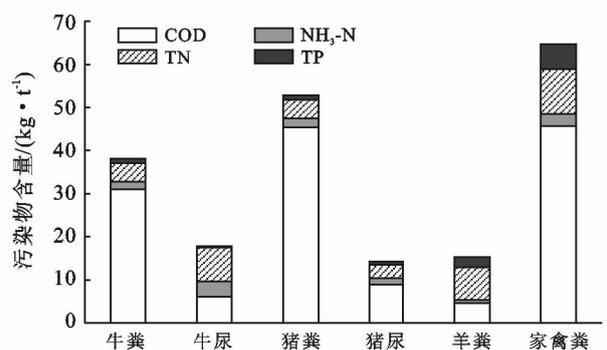
### 1.1 研究背景

2016 年末四川省常住人口  $8.26 \times 10^7$  人,其中 50.79% 的居民主要从事农业生产<sup>[9]</sup>,是一个典型的农业地区和畜禽养殖业大区,养殖业在农业经济中占

有重要地位。四川省畜禽养殖业大多都没有建立粪污处理设施,污染物直接或间接冲刷进入地表水环境,使得水环境生态遭到破坏,局部水体富营养化和主要污染物指标超标严重,对人们的生产和生活造成巨大影响,畜禽养殖污染已成为四川农业面源污染最重要的来源之一。

### 1.2 基础数据

本文以猪、牛、羊和家禽(含兔子)的粪便为研究对象,选取统计年鉴中出栏量或存栏量进行统计。饲养数量考虑畜禽饲养周期,猪和家禽的饲养量以当年出栏数计,牛和羊的饲养量以年末存栏量计<sup>[3,10]</sup>。各类粪尿的日排泄系数以国家环保部统计数据为基础<sup>[11]</sup>,结合中国分省畜禽日产污系数<sup>[12]</sup>和四川省规模养殖产排污系数实测值<sup>[13]</sup>,最终确定猪、牛粪和尿的日排泄系数分别为 4.80, 3.86, 26.12, 11.70 kg/d, 羊、家禽粪的日排泄系数分别为 2.09, 0.12 kg/d。畜禽粪便中主要污染物为化学需氧量(COD), 氨态氮(NH<sub>3</sub>-N), 全氮(TN)和全磷(TP)<sup>[14-15]</sup>,其平均含量以及进入水体的流失率根据以往研究<sup>[3,10-11]</sup>和国家环保部公布的数据确定,详见图 1 和表 1。



注: COD 为化学需氧量, 反映水中受还原性物质污染的程度。

图 1 四川省各类畜禽粪便中主要污染物含量

表 1 四川省畜禽粪便污染物进入水体的流失率 %

污染物	牛粪	猪粪	羊粪	家禽粪	牛猪尿
COD	6.16	5.58	5.5	8.59	50
NH <sub>3</sub> -N	2.22	3.04	4.1	4.15	50
TN(全氮)	5.68	5.34	5.3	8.47	50
TP(全磷)	5.5	5.25	5.2	8.42	50

注: COD 为化学需氧量, 反映水中受还原性物质污染的程度。

### 1.3 负荷估算及预警方法

1.3.1 畜禽粪便污染流失量负荷估算 畜禽养殖污染的产生一般经历以下 3 个过程:①产生畜禽粪便;②畜禽粪便和污水排放到周围环境中;③未经处理利用的粪便和污水进入水体。本文采用输出系数模型描述畜禽养殖污染过程,有别于传统的具有物理基础的模型,输出系数模型克服了面源污染的复杂性、随机性等带来的建模困难,能在基础资料较少的情况下,较好地解决面源污染负荷估计问题<sup>[3,10,16]</sup>。根据畜禽数量、饲养周期和不同畜禽种类的排泄系数,通过输出系数模型,估算畜禽粪便年产生量(公式 1),各污染物的含量(公式 2)和流失量(公式 3)

$$W = \frac{L_q}{1000} \times T \times C \quad (1)$$

$$L_p = W \times L_c / 1000 \quad (2)$$

$$V_q = L_p \times V_r \quad (3)$$

式中: $W$ ——各类畜禽粪便年产生量(t); $L_q$ ——畜禽数量(只/头); $T$ ——饲养周期(d),本文中猪取 199 d,牛、羊取 365 d,家禽取 210 d; $C$ 为各类粪便排泄系数(kg/d),取值见基础数据部分; $L_p$ ——畜禽粪便污染量(t); $L_c$ ——畜禽粪便污染物含量(kg/t),取值见图 1,根据国家环保总局发布的统计数据确定<sup>[3,10-11]</sup>; $V_q$ ——畜禽粪便污染物流失量(t); $V_r$ ——进入水体流失率(%),取值见表 1。

1.3.2 畜禽粪便耕地负荷估算及预警 畜禽粪便耕地承载力指一定时间、一定范围耕地消纳粪便的能力,本研究中用土壤对畜禽粪便的负荷量来表示。不同畜禽粪便的肥效养分有差异,故耕地对不同种类粪便的消纳量也有所差异。为方便统计,本研究使用换算系数将畜禽粪便换算成猪当量,计算土地对畜禽粪便的负荷量<sup>[11-12,14]</sup>。各类畜禽粪尿折算猪当量系数见表 2。猪粪中 N、P 分别占 0.65%和 0.169%(以 N 和  $P_2O_5$  计)<sup>[2]</sup>。

表 2 四川省各类畜禽粪尿折算猪当量系数 %

指标	牛粪	牛尿	猪粪	猪尿	羊粪	家禽粪
换算系数	0.69	1.23	1	0.57	1.23	2.1

耕地环境承载力采用单位耕地面积畜禽粪便负荷量来表示<sup>[17]</sup>(式 4),并用单位耕地面积 N、P 负荷量来衡量耕地污染情况,计算公式如下(式 5 和 6):

$$q = \frac{Q}{S} = \sum \frac{X \times T}{S} \quad (4)$$

$$q_N = \frac{Q \times 0.65\% \times 1000}{S} \quad (5)$$

$$q_P = \frac{Q \times 0.169\% \times 1000}{S} \quad (6)$$

式中: $q$ ——耕地畜禽粪尿负荷量( $t/hm^2$ ); $Q$ ——各类畜禽粪尿的猪粪当量(t); $S$ ——有效耕地面积( $hm^2$ ); $X$ ——某类畜禽粪尿排放量(t); $T$ ——某类畜禽粪尿猪当量的换算系数; $q_N$ ——单位耕地面积 N 负荷量; $q_P$ ——单位耕地面积 P 负荷量。预警值计算公式如下:

$$R = \frac{q}{P} \quad (7)$$

式中: $R$ ——耕地预警值, $P$ ——最大理论适用量( $t/hm^2$ )。

每公顷土地能够承受的畜禽粪尿在 30~45 t 左右,若高出这一水平会超过土壤最大承载力能力<sup>[9]</sup>。从环境风险和环境经济的角度考虑,本文选取平均值 37.5 t 作为最大理论适宜量。对耕地预警值( $R$ )进行分级<sup>[3,10]</sup>,分为 I 到 VI 级,用以评价研究区域内畜禽粪便对环境造成的压力及潜在影响,I 级为对环境无威胁,VI 为对环境严重威胁。各等级所对应的预警值详见表 3。

表 3 四川省畜禽粪便污染耕地承载力预警值 R 分区

负荷预警级	负荷预警值	环境影响描述
I 级	$0 < R \leq 0.4$	对环境无威胁
II 级	$0.4 < R \leq 0.7$	对环境稍有威胁
III 级	$0.7 < R \leq 1.0$	对环境较轻威胁
IV 级	$1.0 < R \leq 1.5$	对环境有威胁
V 级	$1.5 < R \leq 2.5$	对环境较重威胁
VI 级	$R > 2.5$	对环境严重威胁

## 2 结果与分析

### 2.1 畜禽粪便产量分析

根据计算结果,四川省 2016 年年末畜禽粪尿总产生量  $2.94 \times 10^8$  t,粪占 67%,尿占 33%。各种粪便中牛粪产生量最大,为  $9.22 \times 10^7$  t,占总产生量的 31.32%;其次是猪粪,  $6.95 \times 10^7$  t,占总产生量的 23.6%;再次是家禽粪,  $2.20 \times 10^7$  t,占总产生量的 7.45%;最少的是羊粪,  $1.36 \times 10^7$  t,占总产生量的 4.62%。由此可知,四川省畜禽粪便产生主要集中在牛、猪养殖业,且猪养殖在四川省的分布较为均匀,牛的分布则呈现一定的区域性,在甘阿凉地区主要以牛为养殖畜禽种类,以上三州牛粪和尿的产生量均占总牛粪和尿产生量的 57%。

由图 2 可见各市州畜禽粪便产生量空间分布,甘孜州、凉山州、阿坝州、达州市的畜禽粪便产生量较大,分别为  $3.37 \times 10^7$ ,  $3.24 \times 10^7$ ,  $2.589 \times 10^7$ ,  $2.11 \times 10^7$  t,畜禽粪便产生量最小为攀枝花市,仅有  $2.92$

$\times 10^6$  t。不同市州间粪便产生量出现差异的原因主要是各市州之间经济水平和畜牧业发展不平衡,经济发展相对落后地区,以农业发展为主,规模化畜禽养殖业所占比重较大,粪便产生量也较大。

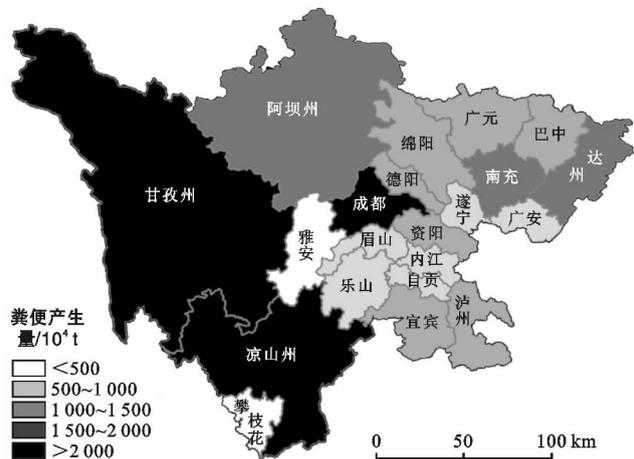


图 2 2016 年四川省各市州畜禽粪尿产生量负荷

### 2.2 畜禽粪便污染物产生负荷量及流失量分析

四川省畜禽粪便污染物产生负荷总量为  $8.08 \times 10^6$  t,

其中 COD,  $\text{NH}_3\text{-N}$ , TN 和 TP 产生量分别占总产生量的 65%, 8%, 22% 和 5%。由于大部分畜禽粪便污染物中 COD 含量都较大,因此 COD 的产生负荷量也高。各市州畜禽粪便主要污染物产生负荷量空间分布情况见图 3。各市州污染物产生负荷量有明显差异,主要污染物最大总产生负荷量均出现在甘孜州和凉山州,分别为  $1.07 \times 10^6$  t 和  $1.01 \times 10^6$  t。TN、 $\text{NH}_3\text{-N}$  和 COD 产生负荷量在甘孜州、凉山州和阿坝州最大, TN 产生负荷量在以上三州分别为  $1.86 \times 10^5$  t,  $1.76 \times 10^5$  t 和  $1.43 \times 10^5$  t;  $\text{NH}_3\text{-N}$  产生负荷量在以上三州的负荷分别  $7.47 \times 10^4$  t,  $6.29 \times 10^4$  t,  $5.69 \times 10^4$  t; COD 产生负荷量在以上 3 州分别为  $7.73 \times 10^5$ ,  $7.34 \times 10^5$ ,  $5.93 \times 10^5$  t。TP 产生负荷量在凉山州、甘孜州和达州市最大,分别为  $3.85 \times 10^4$ ,  $3.29 \times 10^4$ ,  $2.74 \times 10^4$  t。攀枝花市的主要产业为第二产业即加工制造业,占其主要经济来源的 69%,而第一产业只占了 3%,且在第一产业中,畜禽养殖业仅占了 31%,因此畜禽养殖中各类污染物的产生负荷量均最低。

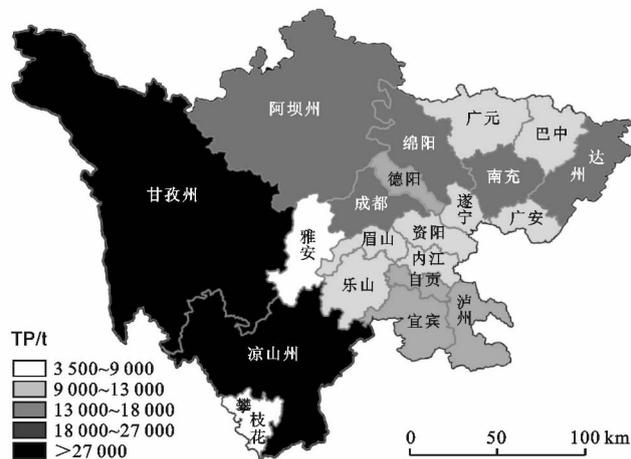
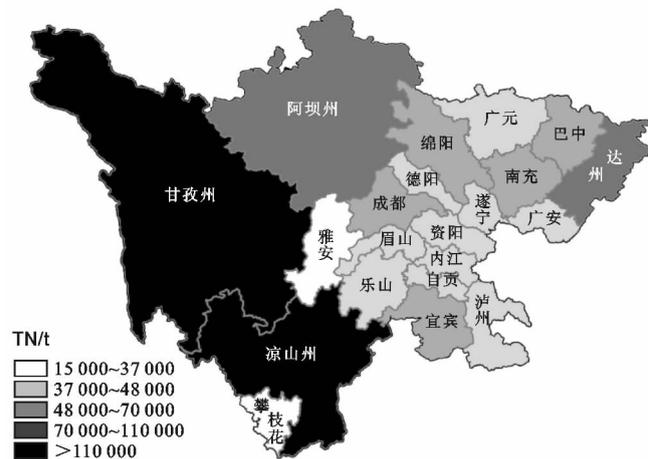
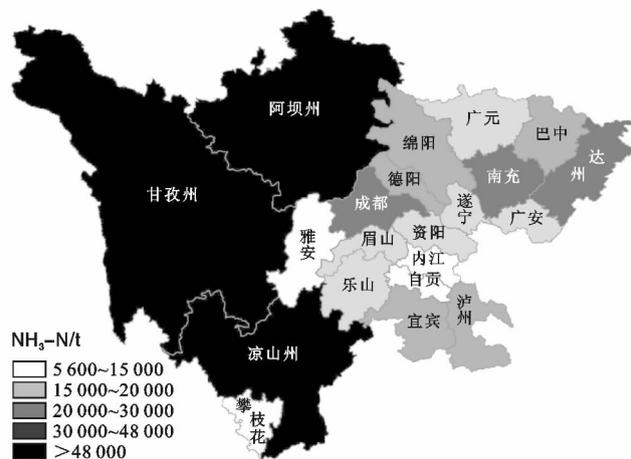
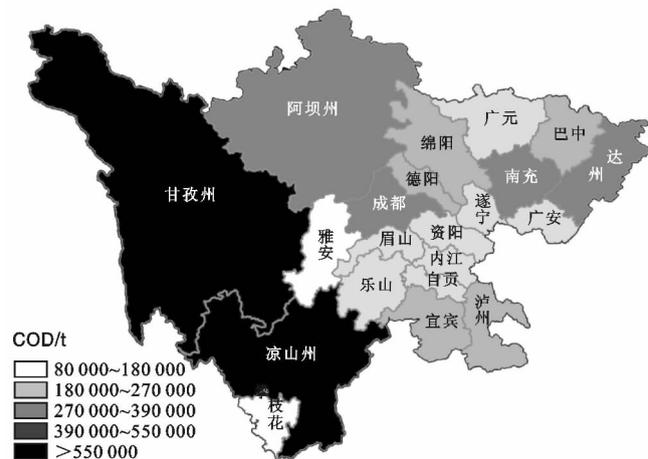


图 3 四川省各市州 COD,  $\text{NH}_3\text{-N}$ , TN 和 TP 输入量

四川省畜禽粪便污染物流失总量为  $1.17 \times 10^6$  t, 占畜禽粪便污染物产生负荷总量的 14.41%; 其中 COD,  $\text{NH}_3\text{-N}$ , TN 和 TP 流失量分别占流失总量的 63%, 9%, 25%, 3%。表 4 对污染流失结构进行分析可知, COD 流失量最高, 是污染物流失结构中最主要的组成部分, 大量未经处理的畜禽粪便直接或间接的进入水体, 将导致水体 COD 含量增加。在流失结构中, 流失量次高的是 TN,  $\text{NH}_3\text{-N}$  和 TP 流失量较小。甘孜州、凉山州和阿坝州的污染物总流失量最大, 分别为:  $1.43 \times 10^5$ ,  $1.29 \times 10^5$ ,  $1.10 \times 10^5$  t。其次是达州市、南充市、成都市和绵阳市, 分别为  $9.39 \times 10^4$ ,  $8.33 \times 10^4$ ,  $7.85 \times 10^4$ ,  $6.61 \times 10^4$  t。攀枝花市污染物总流失量最小, 仅为  $1.21 \times 10^4$  t。达州市、南充市、成都市和绵阳市, 尽管这些地区相对甘阿凉地区畜禽粪便处理技术相对成熟, 但其粪便产生基数较大, 畜禽粪便的产生量和流失量较大; 其次随着城市的发展, 人口数量增多, 耕地面积逐年减少, 畜禽粪便作为有机肥回填利用的途径也在不断减少, 导致其对环境造成潜在污染。

表 4 四川省各市州 COD,  $\text{NH}_3\text{-N}$ , TN 和 TP 流失总量及各污染物流失量

地区	TP/t	TN/t	$\text{NH}_3\text{-N/t}$	COD/t	流失总量/t
成都市	3 138	14 969	5 468	54 925	78 500
自贡市	1 655	6 613	2 158	23 033	33 459
攀枝花	398	3 175	1 213	7 357	12 143
泸州市	1 971	12 621	4 770	35 710	55 072
德阳市	2 153	10 544	3 740	34 005	50 442
绵阳市	2 526	15 576	5 748	42 262	66 112
广元市	1 590	11 443	4 463	31 997	49 493
遂宁市	1 460	8 349	3 179	27 991	40 979
内江市	1 468	7 328	2 661	25 112	36 569
乐山市	1 719	8 445	3 056	28 963	42 183
南充市	3 151	18 346	6 797	55 031	83 325
眉山市	1 607	8 107	2 917	26 407	39 038
宜宾市	2 314	14 390	5 439	42 192	64 335
广安市	1 707	9 918	3 773	32 443	47 841
达州市	3 188	23 560	8 994	58 147	93 889
雅安市	674	4 843	1 857	12 666	20 040
巴中市	1 871	15 651	6 151	38 330	62 003
资阳市	1 855	9 553	3 524	33 589	48 521
阿坝州	2 825	35 300	14 003	57 506	109 634
甘孜州	3 637	46 522	18 493	74 723	143 375
凉山州	4 077	36 529	13 994	74 764	129 364

通过以上计算可知, 粪便产生量排序依次是猪粪 > 家禽粪 > 牛粪 > 猪尿 > 牛尿 > 羊粪, 粪便流失量, 排序依次是猪尿 > 牛尿 > 猪粪 > 家禽粪 > 牛粪 > 羊

粪。可见: ①规模化养殖数量较大, 畜禽粪便的产生量较大, 对应的其污染物的流失量也较大。②对于同种畜禽, 其粪便中尿的流失量要大于其粪便的流失量。

### 2.3 耕地消纳畜禽粪便预警分析

为研究耕地消纳畜禽粪便的潜质以及粪便对环境构成污染的程度, 本文根据各区的猪当量负荷和耕地面积, 计算单位耕地面积的猪当量负荷量预警值 (详见表 5)。

表 5 四川省各市州耕地面积、猪当量负荷及耕地预警值

地区	年末耕地面积/ $\text{hm}^2$	猪当量负荷/ $(\text{t} \cdot \text{hm}^{-2})$	报警值
成都市	421 540	32.22	0.86
自贡市	2 216 530	3.20	0.09
攀枝花	74 960	34.15	0.91
泸州市	410 570	24.14	0.64
德阳市	249 850	37.66	1.00
绵阳市	444 870	28.86	0.77
广元市	353 290	24.29	0.65
遂宁市	270 820	26.11	0.70
内江市	274 560	25.02	0.67
乐山市	272 890	27.92	0.74
南充市	534 890	30.10	0.80
眉山市	242 000	30.29	0.81
宜宾市	487 690	23.44	0.62
广安市	307 710	26.55	0.71
达州市	550 060	31.85	0.85
雅安市	101 090	36.40	0.97
巴中市	324 710	34.40	0.92
资阳市	430 520	22.02	0.59
阿坝州	83 760	247.97	6.61
甘孜州	103 230	259.71	6.93
凉山州	580 550	50.30	1.34

根据计算结果可知, 四川省畜禽粪便猪当量负荷平均值为  $50.31 \text{ t}/\text{hm}^2$ , 平均负荷预警值 1.34, 平均风险评价等级Ⅳ级, 对环境有威胁。但不同市州之间差异颇大, 甘孜州和阿坝州猪当量负荷较高, 分别为  $259.71 \text{ t}/\text{hm}^2$  和  $247.97 \text{ t}/\text{hm}^2$ ; 自贡市猪当量负荷最小, 仅为  $3.2 \text{ t}/\text{hm}^2$ 。结合甘孜州和阿坝州耕地面积分别为  $1.03 \times 10^5 \text{ hm}^2$  和  $8.38 \times 10^4 \text{ hm}^2$ , 甘孜州和阿坝州的耕地预警值高达 6.93 和 6.61, 其单位耕地猪当量负荷级数属Ⅵ级, 即对环境构成严重威胁; 结合凉山州的耕地面积  $5.81 \times 10^5 \text{ hm}^2$ , 其单位耕地猪当量负荷级数Ⅳ级, 预警值为 1.34, 即对环境有威胁。其余多数城市耕地预警值属Ⅲ级, 即对环境较轻威胁, 自贡市耕地预警值属Ⅰ级, 对环境无威胁。由于甘阿凉三州自然条件, 区内种植业作物生长受限,

导致以上各区对粪便作为有机肥回收利用率低。此外,结合当地交通运输、粪便利用工艺等更准确估计畜禽粪利用率。本文中讨论的畜禽粪便消纳场所主要为农耕地,未考虑果园、草地等其他土地类型的粪便消纳能力,甘阿凉地区果园、草地面积占比均高于农耕地面积,在评价此地区时应根据实际情况,将果园、草地等面积计入畜禽粪便消纳面积进行统一计算。

进一步分析比较各市州单位耕地面积 N、P 耕地负荷量分布特征(附图 9)。四川省 N、P 单位耕地面积负荷量平均值分别为  $327,85 \text{ kg/hm}^2$ 。N、P 单位耕地面积负荷量空间分布存在一致性,即 N 负荷量大的区域,P 的负荷量也相应较大。最大 N、P 单位耕地面积负荷量出现在甘孜州和阿坝州:N 在甘孜州和阿坝州分别为  $1.69 \times 10^3, 1.61 \times 10^3 \text{ kg/hm}^2$ ;P 在甘孜州和阿坝州  $439,419 \text{ kg/hm}^2$ 。其次为凉山州,N、P 单位耕地面积负荷量分别为  $327,85 \text{ kg/hm}^2$ 。除以上 3 州外,其余各市 N、P 单位耕地面积负荷平均值分别为  $180.06, 46.82 \text{ kg/hm}^2$ ,自贡市最小,分别为  $20.79, 5.41 \text{ kg/hm}^2$ 。对比欧盟关于投入农田粪便氮、磷的环境污染指标,N 投入最高限值  $170 \text{ kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ 和 P 投入最高限值  $40 \text{ kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ <sup>[19-20]</sup>,四川境内阿坝州、甘孜州和凉山州的 N、P 单位耕地面积负荷量均已明显超标,对环境构成严重污染隐患,而其他市的单位耕地面积的 N、P 负荷值则略超出标准,对环境有一定的威胁,其威胁程度相对较小。

### 3 结论与建议

本文通过对四川省 2016 年畜禽粪便量、污染物产生量、流失量及耕地负荷计算,得到以下结论:①四川省畜禽粪便污染的来源主要是牛粪和猪粪,不同州市畜禽粪便产生量有较大差异。畜禽粪便污染物中 COD 产生量最大,TP 产生量最小,污染物产生量与流失量成正比关系;②四川省畜禽粪便单位面积耕地猪粪当量负荷平均值为  $50.31 \text{ t/hm}^2$ ,单位耕地猪粪当量负荷警报值为 1.34,总体级别为Ⅳ级,现阶段畜禽粪便的产生已对四川省环境有威胁;③不同州市之间耕地畜禽粪便猪粪当量负荷差别较大,阿坝州和甘孜州的单位耕地猪粪当量负荷级数为Ⅵ级,对环境构成很严重威胁;凉山州的单位耕地猪粪当量负荷级数为Ⅳ级,对环境构成有威胁;其他多数城市为Ⅲ级,对环境有较轻威胁。

在今后农业发展及畜禽管理方面,对于警报值为Ⅱ和Ⅲ级市州,建议优化其畜禽养殖产业结构,科学规划养殖规模大小,减少畜禽粪污排放;对于报警值

为Ⅳ级的区域,建议作为限制发展区,限制其畜禽养殖规模再扩张,采取部分畜种迁移至有承载力的区域养殖或增加耕地面积和作物种植面积,同时积极争取各级政府及环保部门、单位的污染治理投入,推广农牧结合、种养平衡、生态循环的发展,从而促进因地制宜的畜禽生态养殖模式。

本文采用输出系数模型对畜禽养殖污染物负荷进行估算,模型中的系数流失率等来自经验平均数据以及文献报道,未考虑饲养方式、饲料、畜禽品种以及饲养场地流失条件差异造成的不同情况。另一方面,本研究将耕地作为畜禽粪便的承载区域,未考虑到林地、草原等作为承载区域,需进一步研究畜禽粪便的最终去处以便更准确计算环境预警值。因此,在今后需在这些方面开展相关实验和模拟研究,获取更可靠的估算参数及数据,以便更准确计算畜禽养殖的环境污染负荷。

#### [ 参 考 文 献 ]

- [1] 贾伟.我国粪肥养分资源现状及其合理利用分析[D].北京:中国农业大学,2014.
- [2] 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.
- [3] 张绪美,董元华,王辉,等.中国畜禽养殖结构及其粪便 N 污染负荷特征分析[J].环境科学,2007,28(6):1311-1318.
- [4] 杨飞,杨世琦,诸云强,等.中国近 30 年畜禽养殖量及其耕地氮污染负荷分析[J].农业工程学报,2013,29(5):1-11.
- [5] 刘晓利,许俊香,王方浩,等.我国畜禽粪便中氮素养分资源及其分布状况[J].河北农业大学学报,2005,28(5):27-32.
- [6] 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.
- [7] 王晓燕,汪清平.北京市密云县耕地畜禽粪便负荷估算及风险评价[J].农村生态环境,2005,21(1):30-34.
- [8] 胡芸芸,王永东,李廷轩,等.沱江流域农业面源污染排放特征解析[J].中国农业科学,2015,48(18):3654-3.
- [9] 四川省统计局.四川省统计年鉴[M].(20161103)[20180630]http://www.sc.stats.gov.cn/tjcbw/tjnj/2016/zk/indexch.htm 2016.
- [10] 徐勇峰,阮子学,吴翼,等.环洪泽湖地区耕地养殖污染负荷估算及其风险评价[J].南京林业大学学报:自然科学版,2016,40(4):35-41.
- [11] 国家环境保护总局自然生态保护司.全国规模化畜禽养殖业污染情况调查及防治对策[M].北京:中国环境科学出版社,2002.8-26,50-58.
- [12] 周天墨,付强,诸云强,等.中国分省畜禽产污系数优化

- 及污染物构成时空特征分析[J]. 地理研究, 2014, 33(4): 762-776.
- [13] 何志平, 曾凯, 李正确, 等. 四川规模猪场产排污系数测定[J]. 中国沼气, 2010, 28(4): 10-14.
- [14] 武淑霞. 我国农村畜禽养殖业氮磷排放变化特征及其对农业面源污染的影响[D]. 北京: 中国农业科学院, 2005.
- [15] 仇焕广, 井月, 廖绍攀, 等. 我国畜禽污染现状与治理政策的有效性分析[J]. 中国环境科学, 2013, 33(12): 2268-2273.
- [16] 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: 323-349.
- [17] 易秀, 陈生婧, 田浩. 陕西省养殖业畜禽粪便氮磷耕地负荷的时空分布[J]. 水土保持通报, 2016, 36(3): 235-240.
- [18] 彭里, 王定勇. 重庆市畜禽粪便年排放量的估算研究[J]. 农业工程学报, 2004, 20(1): 288-292.
- [19] 焦隽. 江苏省农村主要污染源氮磷污染负荷区域评价及控制对策[D]. 南京: 南京农业大学, 2008.
- [20] 刘培芳, 陈振楼, 许世远, 等. 长江三角洲城郊畜禽粪便的污染负荷及其防治对策[J]. 长江流域资源与环境, 2002, 11(5): 456-460.
- [21] 陈微, 刘丹丽, 刘继军, 等. 基于畜禽粪便养分含量的畜禽承载力研究[J]. 中国畜牧杂志, 2009, 45(1): 46-50.
- [22] 刘军会, 高吉喜, 马苏, 等. 内蒙古生态环境敏感性综合评价[J]. 中国环境科学, 2015, 35(2): 591-598.
- [23] 仇焕广, 廖绍攀, 井月, 等. 我国畜禽粪便污染的区域差异与发展趋势分析[J]. 环境科学, 2013, 34(7): 2766-2774.
- [24] Lemerrier B, Gaudin L, Walter C, et al. Soil phosphorus monitoring at the regional level by means of a soil test database[J]. Soil Use and Management, 2008, 24(2): 131-138.
- [25] Schroder J J, Aarts H F M, Ten Berge H F M, et al. An evaluation of whole-farm nitrogen balances and related indices for efficient nitrogen use[J]. European Journal of Agronomy, 2003, 20(1/2): 33-44.
- [26] 代舜尧. 对甘孜州养殖污染环境治理思考[J]. 中国畜禽种业, 2018, 14(1): 5.

(上接第 225 页)

- [2] 张国庆, 杨吉华, 于连家, 等. 石灰岩山地不同整地组合对侧柏林蓄水保土功能的影响[J]. 水土保持学报, 2013, 7(1): 209-214.
- [3] 刘轶. 森林抚育管理的有效途径[J]. 中国农业信息, 2016(11): 54-55.
- [4] 赵匡记, 汪加魏, 施侃侃, 等. 北京市西山林场游憩林抚育的森林健康评价[J]. 中南林业科技大学学报, 2014, 34(10): 65-69.
- [5] 胡建朋, 杨吉华, 罗明达, 等. 山东砂石山区不同林分类型土壤的蓄水效益[J]. 中国水土保持科学, 2011, 9(5): 67-72.
- [6] 汪永文, 王力, 王丽丽, 等. 马尾松混交林林下植被结构及生物量特征研究[J]. 安徽农业大学学报, 2010, 37(2): 312-316.
- [7] 李小倩, 杨吉华, 魏晓明. 鲁中南石灰岩山地针阔混交林土壤理化性状及水文效应[J]. 水土保持学报, 2016, 30(1): 208-211, 230.
- [8] 胡建朋, 杨吉华, 罗明达, 等. 山东石灰岩山地不同林分类型土壤入渗特征研究[J]. 水土保持学报, 2011, 25(3): 54-58.
- [9] 刘丽. 济南主城区石灰岩山地公园适生木本植物选择研究[D]. 济南: 山东建筑大学, 2017.
- [10] 杨菲, 杨吉华, 艾钊, 等. 鲁中片麻岩低山丘陵针阔混交林蓄水保土效益研究[J]. 水土保持学报, 2014, 28(2): 51-56.
- [11] 董波, 万福绪, 严妍, 等. 徐州市石灰岩山地不同植被恢复模式的碳储量[J]. 水土保持通报, 2015, 35(3): 288-292.
- [12] 陈勇, 孙冰, 廖绍波, 等. 城市森林林内景观评价指标筛选研究[J]. 中国农学通报, 2013, 29(16): 32-36.
- [13] 赵娟. 层次分析法在太行山中部造林树种选择中的应用[J]. 水土保持通报, 2017, 37(4): 201-206.
- [14] 杨洋. 基于层次分析法的绿道景观评价模型的构建与应用[D]. 广州: 华南农业大学, 2016.
- [15] 刘营营, 余冬立, 刘冬冬, 等. 土地利用与土壤容重双因子对土壤水分入渗过程的影响[J]. 水土保持学报, 2013, 27(5): 84-88, 94.
- [16] 赵筱青, 和春兰, 许新惠. 云南山地尾叶桉类林引种对土壤物理性质的影响[J]. 生态环境学报, 2012, 21(11): 1810-1816.
- [17] 姜霞, 张喜, 张佐玉, 等. 不同喀斯特峡谷土壤物理性质空间变异的研究[J]. 中南林业科技大学学报, 2013, 33(4): 87-90, 96.
- [18] 衣晓丹. 不同发育阶段杉木人工林土壤理化性质及凋落物养分储存量研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2013.