

# 青海省 2009—2023 年农业面源 污染结构及变化特征

陈尧<sup>1</sup>, 李月梅<sup>2,3</sup>, 塔林葛娃<sup>2,3</sup>, 操一芸<sup>2</sup>,  
付娇娇<sup>2</sup>, 王小梅<sup>2</sup>, 王慧<sup>1</sup>, 周子哲<sup>2</sup>, 宋明丹<sup>2,3</sup>

(1.青海大学农牧学院, 青海 西宁 810016; 2.青海大学农林科学院,  
青海 西宁 810016; 3.农业农村部农业环境西宁野外科学观测研究站, 青海 西宁 810016)

**摘要:** [目的] 分析青海省农业面源污染负荷特征, 为青海省及其他生态脆弱区制定农业污染防控和生态保护政策提供重要参考。[方法] 基于青海省 2009—2023 年统计数据, 采用产排污系数法核算种植业、畜禽养殖业及农村生活源中总氮(TN)、总磷(TP)、化学需氧量(COD)和氨氮(NH<sub>3</sub>-N)的排放量, 选取不确定参数进行敏感性分析, 并结合等标污染负荷法评价污染源和污染物的贡献特征。[结果] ①2009—2023 年青海省农业面源污染排放总量呈上升趋势, 排放量从 2.17×10<sup>5</sup> t 增至 3.65×10<sup>5</sup> t, 增幅达 67.9%。其中, COD 排放量最大, 为 1.91×10<sup>5</sup>~3.34×10<sup>5</sup> t, 占总排放量的 87.72%~91.63%; TN 次之, 排放量为 2.23×10<sup>4</sup>~2.52×10<sup>4</sup> t, 占总排放量的 6.91%~10.28%。②畜禽养殖业是主要排放源, 排放量为 1.74×10<sup>5</sup>~3.24×10<sup>5</sup> t, 占总排放量的 80.21%~88.89%; 农村生活源次之, 排放量为 2.78×10<sup>4</sup>~2.95×10<sup>4</sup> t, 占总排放量的 7.71%~12.79%; 畜禽养殖业对区域污染负荷的调控最为敏感, 居于优先控制地位。③等标污染负荷年排放总量为 4.42×10<sup>10</sup>~5.69×10<sup>10</sup> m<sup>3</sup>, 其中, TN 等标污染负荷量为 2.23×10<sup>10</sup>~2.52×10<sup>10</sup> m<sup>3</sup>, 等标污染负荷比最大, 为 44.30%~50.61%, 是主要污染物; 畜禽养殖业等标污染负荷量为 2.72×10<sup>10</sup>~4.31×10<sup>10</sup> m<sup>3</sup>, 等标污染负荷比最大, 在 61.69%~75.78% 之间, 是主要污染源。结合污染源和污染物的等标污染负荷特征看, 畜禽养殖业中 TN 的等标污染负荷量最大, 为 1.17×10<sup>10</sup>~1.68×10<sup>10</sup> m<sup>3</sup>, 等标污染负荷比为 26.29%~29.46%。[结论] 青海省农业面源污染治理需优先管控畜禽养殖业, 并将 TN 和 COD 作为关键控制污染物, 实现区域农业污染负荷的有效削减, 筑牢高原水生态安全屏障。

**关键词:** 农业; 面源污染; 产排污系数法; 等标污染负荷法

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2026)02-0121-11

中图分类号: X52, X71

**文献参数:** 陈尧, 李月梅, 塔林葛娃, 等. 青海省 2009—2023 年农业面源污染结构及变化特征[J]. 水土保持通报, 2026, 46(2): 121-131. Chen Yao, Li Yuemei, Talingewa, et al. Structure and variation characteristics of agricultural non-point source pollution in Qinghai Province from 2009 to 2023 [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2026, 46(2): 121-131.

DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2026.02.005

CSTR: 32312.14.stbctb.2026.02.005

## Structure and variation characteristics of agricultural non-point source pollution in Qinghai Province from 2009 to 2023

Chen Yao<sup>1</sup>, Li Yuemei<sup>2,3</sup>, Talingewa<sup>2,3</sup>, Cao Yiyun<sup>2</sup>,  
Fu Jiaojiao<sup>2</sup>, Wang Xiaomei<sup>2</sup>, Wang Hui<sup>1</sup>, Zhou Zizhe<sup>2</sup>, Song Mingdan<sup>2,3</sup>

(1.College of Agriculture and Animal Husbandry, Qinghai University,  
Xining, Qinghai 810016, China; 2.Academy of Agriculture and Forestry Sciences, Qinghai  
University, Xining, Qinghai 810016, China; 3.Xining Field Scientific Observation and Research  
Station for Agro-Environment, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Xining, Qinghai 810016, China)

**Abstract:** [Objective] The characteristics of agricultural non-point source pollution load in Qinghai Province were

收稿日期: 2025-06-18

修回日期: 2025-10-31

采用日期: 2025-11-03

资助项目: 青海省重大科技专项“柴达木盆地盐碱地改良与饲草高效栽培关键技术研究与集成”(2023-NK-A3)

第一作者: 陈尧(1999—), 女(汉族), 宁夏回族自治区平罗县人, 硕士研究生, 研究方向为农业资源与环境。Email: chenyaoyao\_6384@163.com。

通信作者: 宋明丹(1986—), 女(汉族), 河北省衡水市人, 博士, 副研究员, 主要从事农业资源与环境方面的研究。Email: hi0045@163.com。

analyzed in order to provide important references for formulating agricultural pollution control and ecological protection policies in Qinghai and other ecologically fragile areas. [Methods] Based on statistical data from Qinghai Province from 2009 to 2023, emissions of total nitrogen (TN), total phosphorus (TP), chemical oxygen demand (COD), and ammonia nitrogen ( $\text{NH}_3\text{-N}$ ) from crop farming, livestock and poultry breeding, and rural domestic sources were estimated using the pollutant generation and discharge coefficient-based method. Sensitivity analysis was conducted by selecting uncertain parameters. The contribution characteristics of pollution sources and pollutants were assessed using the equivalent standard pollution load method. [Results] From 2009 to 2023, the total agricultural non-point source pollution emissions in Qinghai Province showed an increasing trend, rising from  $2.17 \times 10^5$  t to  $3.65 \times 10^5$  t, an increase of 67.9%. In terms of pollutant type, COD emissions were the largest, ranging from  $19.06 \times 10^4$  t to  $3.34 \times 10^5$  t and accounting for 87.72%—91.63% of the total emissions. TN emissions ranked second, ranging from  $2.23 \times 10^4$  t to  $2.52 \times 10^4$  t and accounting for 6.91%—10.28%. Regarding the pollution source structure, livestock and poultry breeding was the primary emission source, with emissions of  $1.74 \times 10^5$ — $3.24 \times 10^5$  t, contributing 80.21%—88.89% of the total emissions. Rural domestic sources ranked second, emitting  $2.78 \times 10^4$ — $2.95 \times 10^4$  t and accounting for 7.71%—12.79%. Sensitivity analysis indicated that livestock and poultry breeding was the most sensitive to regional pollution load regulation, identifying it as the priority for control. The total annual equivalent standard pollution load ranged from  $4.42 \times 10^{10}$   $\text{m}^3$  to  $5.69 \times 10^{10}$   $\text{m}^3$ . Among these, TN had the largest equivalent standard pollution load of  $2.23 \times 10^{10}$   $\text{m}^3$  to  $2.52 \times 10^{10}$   $\text{m}^3$ , accounting for 44.30%—50.61%, making it the primary pollutant. Livestock and poultry breeding had the largest equivalent standard pollution load of  $2.72 \times 10^{10}$   $\text{m}^3$  to  $4.31 \times 10^{10}$   $\text{m}^3$ , accounting for 61.69%—75.78%, identifying it as the dominant pollution source. Considering the equivalent standard pollution load characteristics of both pollution sources and pollutants, TN from livestock and poultry breeding constituted the largest portion of the equivalent standard pollution load at  $1.17 \times 10^{10}$  to  $1.68 \times 10^{10}$   $\text{m}^3$ , representing 26.29%—29.46%. [Conclusion] Addressing agricultural non-point source pollution in Qinghai Province should prioritize the control of livestock and poultry breeding, with TN and COD identified as the key pollutants to control, so as to effectively reduce the regional agricultural pollution load and strengthen the ecological security barrier of the plateau water system.

**Keywords: agriculture; non-point source pollution; pollutant generation and discharge coefficient-based method; equivalent standard pollution load method**

农业面源污染因其分散性、隐蔽性和治理复杂性,已成为全球生态环境的治理难点<sup>[1]</sup>。在生态脆弱区,农业面源污染更容易对水体、土壤和生态系统产生影响<sup>[2]</sup>。青海省作为长江、黄河和澜沧江的源头地区,其生态环境对于下游流域的水资源安全和生态平衡具有重要意义<sup>[3]</sup>。由于农业发展、气候变化以及土地利用方式等,青海省农业面源污染问题日益突出,亟需对其变化规律进行系统研究,为区域生态环境保护与可持续发展提供科学依据。

近年来,在农业面源污染研究领域,关于污染物负荷估算、空间分布特征以及污染形成机制等方面取得显著进展<sup>[4]</sup>。在污染物负荷估算方面,排污系数法、输出系数法和模型法等方法被国内外学者广泛应用<sup>[5]</sup>。排污系数法形式简单,参数较少,应用性强,适合在缺乏实验条件的情况下采用<sup>[6]</sup>。输出系数法考虑了土地利用、污染物的排放和处理情况等,确定不同污染源的输出系数,对大尺度流域的非点源污

染进行估算和预测<sup>[5]</sup>。模型法主要包括 SWAT 模型、DPSIR 模型和 ANSWERS 模型等,应用过程中的参数较多,导致模型的校准和验证存在困难<sup>[7]</sup>。区域污染负荷评价主要采用等标污染负荷法,该方法通过标准化不同污染物的环境效应,被广泛应用于识别主要污染源及污染物<sup>[8]</sup>。

2000年以来,青海省农业化肥施用量逐年增加,全省年畜粪总量达  $4.14 \times 10^5$  t,规模化养殖场废弃物处理不足,存在污染风险,作物秸秆大部分用于炊事燃料,对大气环境造成污染<sup>[9]</sup>。尤李俊等<sup>[10]</sup>对湟水流域农业面源污染现状进行研究,结果表明湟水河流域的农业面源污染主要由畜禽粪尿无处理直接排放和化肥农药的使用量不断上升造成。本研究基于农业生产统计数据及污染物产、排放系数等数据,采用产排污系数法、敏感性分析和等标污染负荷法,核算污染物的排放量,解析青海省农业面源污染在不同发展阶段中污染负荷量的变化及来源结构的演变特

征,评价青海省农业面源污染状况,为青海省乃至其他生态脆弱区的农业污染防控和生态保护政策制定提供重要参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 数据来源

青海省2009—2023年农业基础数据包括作物类型、作物产量、化肥折纯量、农村人口数量、畜禽养殖数量等。数据来源于《青海省统计年鉴》及国家数据平台。生活源及农业的产、排污系数参考生态环境部发布的《排放源统计调查产排污核算方法和系数手册》,以下简称《手册》。

### 1.2 研究方法

本研究将青海省农业面源污染划分为2009—2013年、2014—2018年、2019—2023年3个阶段,结合关键年份(2015,2020年)分析污染负荷的演变规律。《手册》中将农业面源污染源划分为种植业、畜禽养殖业、水产养殖业和农村生活源,因青海省水产养殖规模小,研究中暂不考虑,故选取种植业、畜禽养殖业及农村生活源3类污染源,其中,种植业源又分为化肥和秸秆2类,各污染源排放的污染物种类见表1。

表1 各污染源的污染物

Table 1 Pollutants from different pollution sources

污染源	污染物
种植业	化肥 氨氮(NH <sub>3</sub> -N),总氮(TN),总磷(TP) 秸秆 化学需氧量(COD),TN,TP
畜禽养殖业	COD,NH <sub>3</sub> -N,TN,TP
农村生活源	COD,NH <sub>3</sub> -N,TN,TP

#### 1.2.1 种植业污染排放核算

基于输出系数法对青海省化肥源污染物排放量进行估算。化肥污染物排放量=化肥污染物产生量×化肥污染物排放系数,化肥污染物产生量=化肥用量×(1-化肥利用率)×化肥产污系数。青海省化肥利用率参考全国化肥利用率平均值,2009—2013,2014—2018,2019—2023年分别采用33.00%,35.2%,40.2%。化肥施用量采用统计年鉴中的化肥折纯量,根据化肥的化学组成,确定氮肥、磷肥及复合肥(氮磷钾含量相同)的TN和TP产污系数(表2)<sup>[11-12]</sup>。青海省氮肥和磷肥排放系数分别取10%和4%<sup>[11]</sup>,NH<sub>3</sub>-N排放量约为TN排放量的8.3%<sup>[13]</sup>。

秸秆面源污染物负荷量=秸秆污染物产生量×秸秆面源污染排放系数。秸秆污染物产生量=作物产量×草谷比×秸秆产污系数。根据统计年鉴得到青海省作物种植类型和作物产量,主要作物包括小

麦、玉米、油料作物、豆类和薯类。农作物的草谷比和秸秆的COD,TN,TP的产污系数参考已有研究成果<sup>[14-16]</sup>(表3)。本研究仅考虑秸秆还田和弃置堆放的污染物排放量,忽略秸秆的其他利用方式。秸秆还田和弃置堆放量分别占秸秆总量的27.64%和19.41%<sup>[17]</sup>,其COD,TN,TP排放系数参考陶园等<sup>[12]</sup>、吴继忠<sup>[16]</sup>研究成果(表4)。

表2 青海省种植业化肥产污系数

Table 2 Pollutant generation coefficients of chemical fertilizers for crop farming in Qinghai Province

污染物	氮肥	磷肥	复合肥
TN	1.00	0	0.33
TP	0	0.44	0.15

表3 青海省主要农作物草谷比及产污系数

Table 3 Straw-to-grain ratios and pollutant generation coefficients for main crops in Qinghai Province

作物	草谷比	产污系数/(10 <sup>-3</sup> t·t <sup>-1</sup> )		
		COD	TN	TP
小麦	1.10	6.39	5.15	0.90
玉米	1.52	11.23	10.69	2.39
油料作物	3.00	20.57	45.43	3.06
豆类	1.07	17.61	22.23	2.24
薯类	0.50	2.26	1.83	0.67

表4 青海省不同秸秆利用方式的污染物排放系数

Table 4 Pollutant discharge coefficients for different straw utilization methods in Qinghai Province

秸秆利用方式	排放系数		
	COD	TN	TP
秸秆还田	20%	10%	5%
弃置堆放	50%	50%	50%

#### 1.2.2 畜禽养殖业污染排放核算

由于畜禽饲养的周期不同,猪、肉牛以及家禽的饲养量为当年出栏量,奶牛、羊、马、驴、骡的饲养量为年末的存栏量<sup>[18]</sup>。畜禽养殖的污染物排放量通过《手册》中的产排污系数法进行核算。手册中给出规模化养殖和养殖专业户的排污系数(表5),未给定散养和放养的排污系数,青海省的散养和放养比例大,本研究中散养排污系数参考养殖专业户,放养排污系数参考规模化养殖和养殖专业户的平均值<sup>[17]</sup>。畜禽养殖方式的比例及羊、马、驴、骡的排污系数参考陶园等<sup>[12]</sup>和王楠等<sup>[19]</sup>的研究成果,假定马、驴、骡都为放养,马的COD,NH<sub>3</sub>-N,TN,TP排污系数分别为1.21,0.037,1.20,0.25,驴和骡的COD,NH<sub>3</sub>-N,TN,TP排污系数相同,分别为1.03,0.03,1.02,0.21。

表 5 青海省规模化养殖和养殖户养殖排污系数

Table 5 Pollutant discharge coefficients for large-scale and household breeding in Qinghai Province

畜禽种类	规模化养殖排污系数				养殖户养殖排污系数			
	COD	NH <sub>3</sub> -N	TN	TP	COD	NH <sub>3</sub> -N	TN	TP
生猪/(kg·头 <sup>-1</sup> )	3.87	0.170	0.038	0.093	4.41	0.360	0.097	0.070
奶牛/(kg·头 <sup>-1</sup> )	180.24	5.290	0.550	2.120	115.84	9.510	3.270	1.440
肉牛/(kg·头 <sup>-1</sup> )	163.96	4.850	0.630	0.690	73.48	3.720	0.270	0.270
蛋鸡/(kg·羽 <sup>-1</sup> )	0.87	0.050	0.005	0.010	0.78	0.044	0.004	0.003
肉鸡/(kg·羽 <sup>-1</sup> )	0.25	0.011	0.001	0.002	0.48	0.020	0.003	0.010
羊/(kg·头 <sup>-1</sup> )	1.14	0.058	0.076	0.014	1.12	0.390	0.030	0.010

### 1.2.3 农村生活源污染排放核算

农村生活源污染物负荷基于《手册》中的方法进行核算。农村生活污染物产生量=农村常住人口×人均产污强度×365, 污染物排放量=污染物产生量×(1-对生活污水进行处理的行政村比例×污染物综合去除率)。

青海省农村常住人口来自统计年鉴, 青海省各

地区农村生活污水的污染物产污强度(表 6), 综合去除率参考《手册》, COD, NH<sub>3</sub>-N, TN, TP 的综合去除率分别为 60%, 48%, 43%, 46%。青海省对生活污水进行处理的行政村比例来自《中国城乡建设统计年鉴》, 2009, 2013, 2014, 2015, 2018, 2019, 2020, 2023 年分别为 0.90%, 1.20%, 1.20%, 1.30%, 7.56%, 7.56%, 10.27%, 9.55%。

表 6 青海省农村生活污水污染物产污强度

Table 6 Pollutant generation intensity for rural domestic sewage in Qinghai Province

行政区划名称	COD 产污强度/ (g·人 <sup>-1</sup> ·d <sup>-1</sup> )	NH <sub>3</sub> -N 产污强度/ (g·人 <sup>-1</sup> ·d <sup>-1</sup> )	TN 产污强度/ (g·人 <sup>-1</sup> ·d <sup>-1</sup> )	TP 产污强度/ (g·人 <sup>-1</sup> ·d <sup>-1</sup> )
西宁市	22.80	0.47	0.82	0.09
海东市	18.75	0.23	0.50	0.06
海北藏族自治州	18.21	0.15	0.39	0.05
黄南藏族自治州	17.68	0.08	0.30	0.04
海南藏族自治州	17.80	0.10	0.32	0.04
果洛藏族自治州	17.51	0.06	0.27	0.04
玉树藏族自治州	17.80	0.10	0.32	0.04
海西蒙古族藏族自治州	22.04	0.32	0.64	0.07

### 1.2.4 敏感性分析

选取化肥利用率、秸秆产污系数、畜禽养殖排污系数及农村生活污水污染物产污强度等关键参数进行敏感性分析, 识别研究区内的关键控制污染源, 为精准防控提供依据<sup>[20]</sup>。计算公式如下:

$$S_i = \frac{(TL_A - TL_B)/TL_B}{(L_{Ai} - L_{Bi})/L_{Bi}} \quad (1)$$

式中:  $S_i$  表示污染源  $i$  的敏感性;  $TL_A$  和  $TL_B$  分别表示变化前后的总污染负荷;  $L_{Ai}$  和  $L_{Bi}$  表示由不同污染源的变异系数(5%)引起的变化前后污染源  $i$  产生的污染负荷值。

### 1.2.5 等标污染负荷计算

等标污染负荷是指对环境产生影响的污染物排放总量, 某污染物的等标污染负荷是指单位时间排

放的含该污染物的废水等标体积<sup>[4]</sup>。等标污染负荷比是指某污染源或某污染物的等标污染负荷与总等标污染负荷之比, 可以反映某污染源或污染物的污染贡献<sup>[21]</sup>。计算公式如下<sup>[4]</sup>:

$$C_{ij} = \frac{P_{ij}}{C_i} \quad (2)$$

式中:  $C_{ij}$  为第  $j$  个污染源中污染物  $i$  的等标污染排放量( $m^3$ );  $P_{ij}$  为第  $j$  个污染源中污染物  $i$  的排放量;  $C_i$  为污染物  $i$  的阈浓度。结合青海省环境状况公报和水资源公报, COD, NH<sub>3</sub>-N, TN 和 TP 的阈浓度采用《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)中的Ⅲ类标准(COD 20 mg/L, NH<sub>3</sub>-N 1.0 mg/L, TN 1.0 mg/L, TP 0.2 mg/L)。

若某区域内第  $j$  个污染源有  $n$  个污染物或某区域内第  $i$  个污染物来自  $m$  个污染源, 则该区域污染源的

等标污染排放量( $C_j$ )和污染物等标污染排放量( $C_i$ )为

$$C_j = \sum_{i=1}^n C_{ij} \quad (3)$$

$$C_i = \sum_{j=1}^m C_{ij} \quad (4)$$

式中: $C_j$ 和 $C_i$ 分别为某区域内第 $j$ 个污染源和第 $i$ 个污染物的等标污染排放量( $m^3$ )。

区域中等标污染排放总量 $C_{总}$ 为:

$$C_{总} = \sum_{i=1}^n C_i = \sum_{j=1}^m C_j \quad (5)$$

污染物 $i$ 在第 $j$ 个污染源中、污染物 $i$ 在某区域中、污染源 $j$ 在某区域中的等标污染占比分别为 $L_i$ ,  $L$ 和 $L_j$ ,计算公式为

$$L_i = \frac{C_i}{C_j} \times 100\% \quad (6)$$

$$L = \frac{C_i}{C_{总}} \times 100\% \quad (7)$$

$$L_j = \frac{C_j}{C_{总}} \times 100\% \quad (8)$$

## 2 结果与分析

### 2.1 种植业面源污染排放特征

由表7可知,在污染结构方面,秸秆是青海省种植业污染物排放的主要来源,其排放量为9 482.09~11 722.42 t,占种植业排放量的71.36%~85.68%,其中,TN是秸秆源的主要污染物,其排放量5 500.03~6 944.33 t,平均占种植业排放总量的44.89%。化肥的污染物排放量为1 774.56~4 149.72 t,占种植业污染物排放量的14.32%~28.64%,主要污染物为TN,其排放量为1 524.54~3 503.77 t,平均占种植业排放总量的19.57%。从时序变化来看,秸秆污染物排放量在2009—2018年持续下降,2019年后出现回升;而化肥污染物排放量在2015年前波动变化,此后呈持续下降趋势。总体上,青海省种植业面源污染排放量呈先降后升的趋势,2009—2018年在化肥减排主导下总体下降,2019年后随秸秆污染回升出现小幅上升,表明秸秆污染治理已成为青海省种植业面源污染控制的关键环节。

表7 2009—2023年青海省种植业污染物排放情况

Table 7 Pollutant discharge from crop farming in Qinghai Province (2009—2023)

年份	作物秸秆污染物排放量/t			化肥污染物排放量/t			合计
	COD	TN	TP	NH <sub>3</sub> -N	TN	TP	
2009	4 306.25	6 944.33	471.84	246.36	2 968.17	269.15	15 206.10
2013	4 042.76	6 363.79	456.78	290.81	3 503.77	347.25	15 005.16
2014	3 965.05	6 211.76	450.25	281.33	3 389.49	341.24	14 639.12
2015	3 860.97	6 038.60	438.31	290.61	3 501.34	357.77	14 487.60
2018	3 577.92	5 500.03	404.14	243.24	2 930.58	290.59	12 946.50
2019	3 666.77	5 615.61	416.34	169.52	2 042.35	186.46	12 097.05
2020	3 783.05	5 840.22	429.50	146.48	1 764.82	154.71	12 118.78
2023	3 990.38	6 178.36	451.94	126.54	1 524.54	123.48	12 395.24

### 2.2 畜禽养殖业面源污染排放特征

青海省畜禽养殖业污染物排放总量呈持续增长趋势,排放量从2009年的 $1.74 \times 10^5$  t增至2023年的 $3.24 \times 10^5$  t(图1)。从污染物结构来看,COD排放量最多为 $1.60 \times 10^5 \sim 3.03 \times 10^5$  t,占畜禽养殖业排放量的91.61%~93.54%,TN排放量次之,为 $1.17 \times 10^4 \sim 1.68 \times 10^4$  t,占畜禽养殖业排放量的5.17%~6.71%,而NH<sub>3</sub>-N与TP的贡献均不足1.1%。2009—2023年各类污染物排放量呈增长趋势,且不同阶段变化特征差异明显,2019—2023年污染物增长幅度均最大,COD,NH<sub>3</sub>-N,TN和TP增幅

分别为29.51%,9.46%,17.19%和15.62%,污染压力持续加剧。

从畜禽养殖结构来看,污染来源高度集中(图2)。牛和羊是主要的污染贡献者,合计占畜禽养殖业总排放量的96.77%,且牛污染排放占主导地位,其COD,NH<sub>3</sub>-N,TN和TP的平均贡献率分别为83.22%,0.64%,3.64%和0.46%。羊次之,对应污染物平均贡献率分别为6.61%,0.21%,1.93%和0.08%。相比之下,猪、家禽和非主要家畜包括马、驴、骡的污染物排放量占比较小,其污染物排放总量占畜禽养殖业排放量的4%以下。

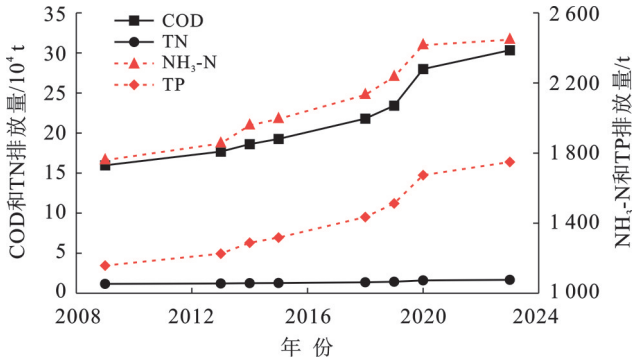
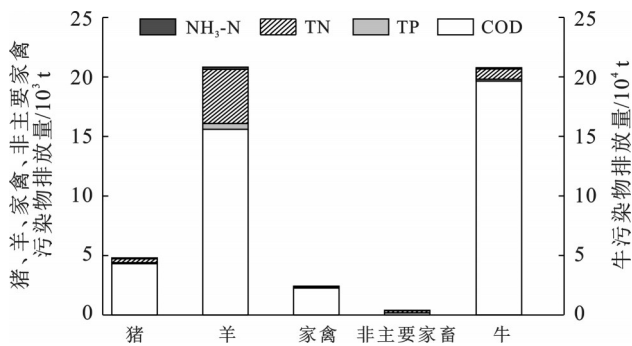


图1 2009—2023年青海省畜禽养殖业各污染物排放量变化  
Fig.1 Variations in pollutant discharge from livestock and poultry breeding industry in Qinghai Province (2009—2023)



注：牛包括肉牛和奶牛，家禽包括肉鸡和蛋鸡，非主要家畜包括马、驴和骡。

图2 青海省2009—2023年畜禽养殖业不同家畜污染物平均排放量

Fig.2 Average pollutant discharge from different livestock in livestock and poultry breeding industry in Qinghai Province (2009—2023)

### 2.3 农村生活源面源污染排放特征

基于产排污系数法的核算结果表明(图3), 2009—2023年青海省农村生活源污染物排放量在  $2.78 \times 10^4 \sim 2.95 \times 10^4$  t 之间波动变化, 其中COD排放量最大, 为  $2.66 \times 10^4 \sim 2.83 \times 10^4$  t, 其排放量平均占农村生活污水排放量的95.81%,  $\text{NH}_3\text{-N}$ , TN和TP的排放量分别平均占农村生活源排放量的1.26%, 2.62%和0.31%。COD,  $\text{NH}_3\text{-N}$ , TN和TP排放量在2015年达到峰值后呈小幅下降趋势。

### 2.4 青海省农业面源污染负荷总特征

2009—2023年青海省农业面源污染物排放总量呈增长趋势, 从  $2.17 \times 10^5$  t 增至  $3.65 \times 10^5$  t, 增幅为67.9%。其中, 畜禽养殖业排放量最大, 其排放量占总排放量的80.21%~88.89%, 农村生活源次之, 占总排放量的7.71%~12.79%, 种植业排放量最少, 占总排放量的3.40%~7.00%。从污染物构成看(图4), COD的污染排放量最大, 为  $1.91 \times 10^5 \sim 3.34 \times 10^5$  t, 占总排

放量的87.72%~91.63%, TN的排放量次之, 为  $2.20 \times 10^4 \sim 2.50 \times 10^4$  t, 占总排放量的6.91%~10.28%,  $\text{NH}_3\text{-N}$ 和TP排放量小, 占比均不足1.1%。

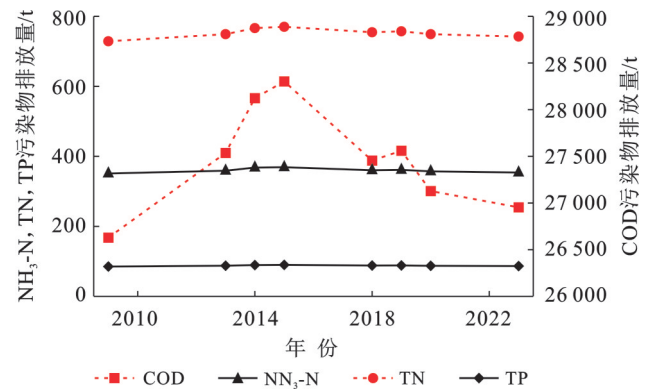


图3 2009—2023年青海省农村生活源污染物排放量变化  
Fig.3 Variations in pollutant discharge from rural domestic sources in Qinghai Province (2009—2023)

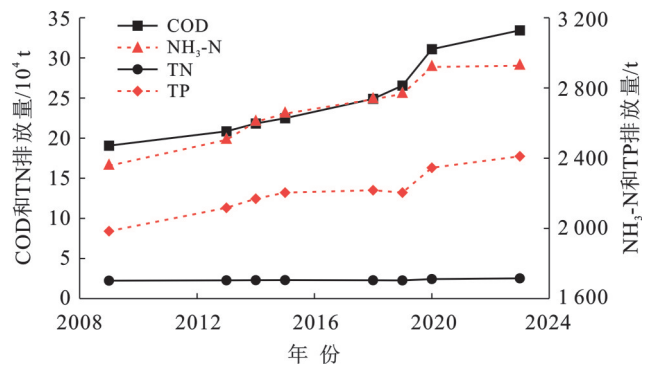


图4 2009—2023年青海省农业面源污染物排放量变化  
Fig.4 Variations in agricultural non-point source pollutant discharge in Qinghai Province (2009—2023)

### 2.5 不同污染源对污染负荷的敏感性分析

通过将各污染源的关键不确定性参数增加5%, 评估其对污染物负荷的敏感性(表8)。研究表明, 畜禽养殖业对各污染物的敏感性均最高, 尤其是对COD的敏感性始终处于最高, 从2009年的0.84上升至2023年的0.91, 对 $\text{NH}_3\text{-N}$ , TN和TP的敏感性也呈持续上升趋势, 分别从2009年的0.75, 0.52和0.58增长到2023年的0.84, 0.67和0.73, 说明该类污染源在区域污染负荷中的主导作用不断增强。化肥对 $\text{NH}_3\text{-N}$ , TN和TP的敏感性在2015年后逐年下降, 分别从0.11, 0.16和0.16降至2023年的0.04, 0.06和0.05。秸秆对COD, TN和TP的敏感性较为稳定, 波动范围小。农村生活源对各污染物的敏感性普遍较低, 表明其污染贡献相对稳定且影响有限。总体而言, 畜禽养殖是青海省农业面源污染控制中需优先管理和精准调控的关键源。

表8 不同污染源对污染物负荷的敏感性  
Table 8 Sensitivity of different pollution sources to pollutant load

污染源	不确定性参数	2009年污染物		2013年污染物		2014年污染物		2015年污染物	
		种类	敏感性	种类	敏感性	种类	敏感性	种类	敏感性
化肥	化肥利用率	NH <sub>3</sub> -N	0.10	NH <sub>3</sub> -N	0.12	NH <sub>3</sub> -N	0.11	NH <sub>3</sub> -N	0.11
		TN	0.13	TN	0.15	TN	0.15	TN	0.16
		TP	0.14	TP	0.16	TP	0.16	TP	0.16
秸秆	秸秆产污系数	COD	0.02	COD	0.02	COD	0.02	COD	0.02
		TN	0.31	TN	0.28	TN	0.28	TN	0.27
		TP	0.24	TP	0.22	TP	0.21	TP	0.20
畜禽养殖业	畜禽养殖排污系数	COD	0.84	COD	0.85	COD	0.85	COD	0.86
		NH <sub>3</sub> -N	0.75	NH <sub>3</sub> -N	0.74	NH <sub>3</sub> -N	0.75	NH <sub>3</sub> -N	0.75
		TN	0.52	TN	0.53	TN	0.56	TN	0.57
农村生活源	农村生活污水 污染物产污强度	TP	0.58	TP	0.58	TP	0.59	TP	0.60
		COD	0.14	COD	0.13	COD	0.13	COD	0.13
		NH <sub>3</sub> -N	0.15	NH <sub>3</sub> -N	0.14	NH <sub>3</sub> -N	0.14	NH <sub>3</sub> -N	0.14
		TN	0.03	TN	0.03	TN	0.03	TN	0.03
		TP	0.04	TP	0.04	TP	0.04	TP	0.04
污染源	不确定性参数	2018年污染物		2019年污染物		2020年污染物		2023年污染物	
		种类	敏感性	种类	敏感性	种类	敏感性	种类	敏感性
化肥	化肥利用率	NH <sub>3</sub> -N	0.09	NH <sub>3</sub> -N	0.06	NH <sub>3</sub> -N	0.05	NH <sub>3</sub> -N	0.04
		TN	0.13	TN	0.09	TN	0.07	TN	0.06
		TP	0.13	TP	0.08	TP	0.07	TP	0.05
秸秆	秸秆产污系数	COD	0.01	COD	0.01	COD	0.01	COD	0.01
		TN	0.24	TN	0.25	TN	0.24	TN	0.25
		TP	0.18	TP	0.19	TP	0.18	TP	0.19
畜禽养殖业	畜禽养殖排污系数	COD	0.88	COD	0.88	COD	0.90	COD	0.91
		NH <sub>3</sub> -N	0.78	NH <sub>3</sub> -N	0.81	NH <sub>3</sub> -N	0.83	NH <sub>3</sub> -N	0.84
		TN	0.60	TN	0.63	TN	0.66	TN	0.67
农村生活源	农村生活污水 污染物产污强度	TP	0.65	TP	0.69	TP	0.71	TP	0.73
		COD	0.11	COD	0.10	COD	0.09	COD	0.08
		NH <sub>3</sub> -N	0.13	NH <sub>3</sub> -N	0.13	NH <sub>3</sub> -N	0.12	NH <sub>3</sub> -N	0.12
		TN	0.03	TN	0.03	TN	0.03	TN	0.03
		TP	0.04	TP	0.04	TP	0.04	TP	0.04

## 2.6 青海省等标污染负荷特征

### 2.6.1 污染源等标污染负荷特征

2009—2023年,青海省农业面源污染源等标污染负荷总量呈上升趋势,从 $4.42 \times 10^{10} \text{ m}^3$ 增至 $5.69 \times 10^{10} \text{ m}^3$ (表9)。从污染源结构看(图5),畜禽养殖业为最主要污染源,其等标污染负荷量由 $2.72 \times 10^{10} \text{ m}^3$ 升至 $4.31 \times 10^{10} \text{ m}^3$ ,等标污染负荷比从61.69%增至75.78%,主导地位持续强化。作物秸秆为第二大污染源,其等标污染负荷量为 $7.70 \times 10^9 \sim 9.52 \times 10^9 \text{ m}^3$ ,

等标污染负荷比为14.99%~21.56%。化肥的等标污染负荷量为 $2.27 \times 10^9 \sim 5.58 \times 10^9 \text{ m}^3$ ,等标污染负荷比在2015年达峰值(11.62%)后降低至2023年的3.99%。农村生活污染源等标污染负荷量为 $2.84 \times 10^9 \sim 3.00 \times 10^9 \text{ m}^3$ ,等标污染负荷占比为5.05%~6.43%。

### 2.6.2 污染物等标污染负荷特征

从污染物类型来看(表10,图6),TN始终为首要污染物,其等标污染负荷量为 $2.23 \times 10^{10} \sim 2.52 \times 10^{10} \text{ m}^3$ ,

等标污染负荷比从 2009 年的 50.61% 下降至 2023 年的 44.30%，但仍高于其他污染物。COD 等标污染负荷量为  $9.53 \times 10^9 \sim 1.67 \times 10^{10} \text{ m}^3$ ，其等标污染负荷比从 2009 年的 21.59% 上升至 2023 年的 29.37%，占比增幅最大。TP 的等标污染负荷量为  $9.92 \times 10^9 \sim 1.21 \times 10^{10} \text{ m}^3$ ，其等标污染负荷比相对稳定，为 21.18%~22.94%。NH<sub>3</sub>-N 的等标污染负荷量为  $2.36 \times 10^9 \sim 2.93 \times 10^9 \text{ m}^3$ ，其等标污染负荷比最小，为 5.14%~5.57%。结合污染源和污染物的等标污染负荷特征，畜禽养殖业 TN 的等标污染负荷量最大，为  $1.17 \times 10^{10} \sim 1.68 \times 10^{10} \text{ m}^3$ ，占比 26.29%~29.46%。

表 9 2009—2023 年青海省污染源等标污染负荷  
Table 9 Equivalent standard pollution load of pollution sources in Qinghai Province (2009—2023)

污染源	等标污染负荷/ $10^8 \text{ m}^3$			
	2009年	2013年	2014年	2015年
化肥	45.60	55.31	53.77	55.81
作物秸秆	95.19	88.50	86.61	84.23
畜禽养殖	272.36	290.00	303.16	310.17
农村生活	28.37	29.23	29.88	30.04
合计	441.52	463.04	473.42	480.25
污染源	2018年	2019年	2020年	2023年
化肥	46.27	31.44	26.85	22.68
作物秸秆	77.00	78.81	81.77	86.38
畜禽养殖	338.64	358.18	407.94	431.27
农村生活	29.27	29.38	28.99	28.77
合计	491.18	497.81	545.55	569.10

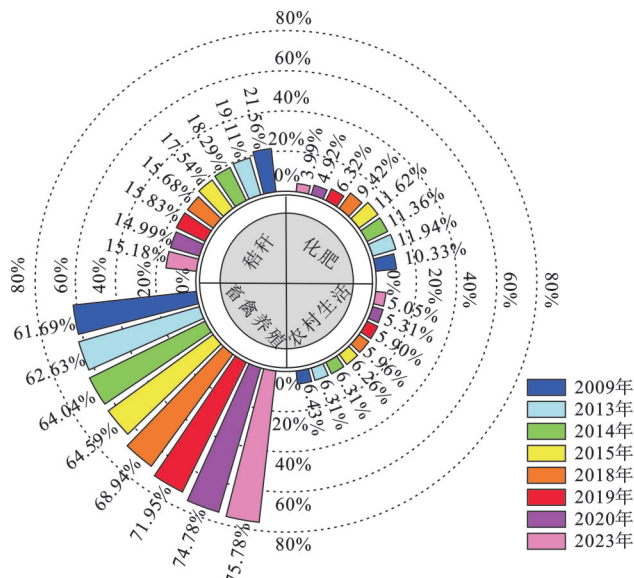


图 5 青海省 2009—2023 年各污染源等标污染负荷比  
Fig.5 Ratios of equivalent standard pollution load by different pollution sources in Qinghai Province (2009—2023)

表 10 2009—2023 年青海省污染物等标污染负荷  
Table 10 Equivalent standard pollution load of pollutants in Qinghai Province (2009—2023)

污染物	等标污染负荷/ $10^8 \text{ m}^3$			
	2009年	2013年	2014年	2015年
COD	95.30	104.22	109.13	112.43
NH <sub>3</sub> -N	23.57	25.05	26.07	26.54
TN	223.44	227.90	229.76	231.09
TP	99.21	105.87	108.47	110.19
合计	441.52	463.04	473.43	480.25
污染物	2018年	2019年	2020年	2023年
COD	124.50	132.74	155.44	167.16
NH <sub>3</sub> -N	27.36	27.66	29.20	29.27
TN	228.44	227.22	243.62	252.12
TP	110.88	110.19	117.29	120.54
合计	491.18	497.81	545.55	569.09

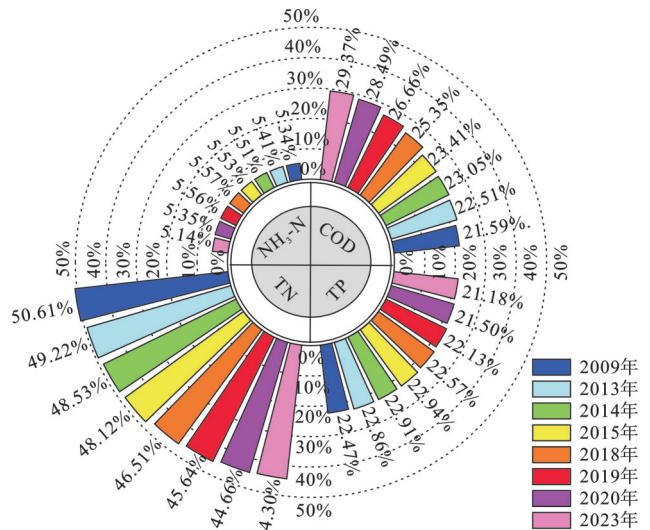


图 6 青海省 2009—2023 年各污染物等标污染负荷比  
Fig.6 Ratios of equivalent standard pollution load by different pollutants in Qinghai Province (2009—2023)

### 3 讨论

#### 3.1 农业面源污染负荷特征

通过对青海省农业面源污染负荷变化特征及各污染源贡献率的研究，明确了青海省的主要污染物和主要污染源。COD、NH<sub>3</sub>-N、TN 和 TP 均呈上升趋势，主要归因于畜禽养殖业污染物排放量的持续增长。这与畜禽养殖业占青海省主导产业密切相关，一方面青海省对畜禽粪便处理能力不足，导致污染负荷高居不下<sup>[22]</sup>，另一方面青海省肉牛的出栏量在 2009—2023 年增加了 1.29 倍，且肉牛的各污染物排放系数远高于其他畜禽。根据《青海省第二次全

国污染普查》公报,2017年全省畜禽养殖业各类污染物排放量占农业污染源排放的首位,其中牛、羊是畜禽养殖业中最主要的污染源,这与本研究结论一致。周芳等<sup>[23]</sup>对西藏农业面源污染的研究表明,TN和TP的排放主要来源于畜禽养殖业,进一步印证了高原生态脆弱区以畜禽养殖污染为主的污染特征。

2009—2023年,青海省种植业污染源的排放量受农业生产活动、污染治理措施和环境变化等多种因素综合影响。作物秸秆污染物排放量受作物种植结构及秸秆综合利用水平影响较大,青海省大部分地区海拔高,平均气温低且干旱少雨,不利于作物秸秆腐烂,因此作物秸秆直接还田率有待提升<sup>[24-25]</sup>。化肥污染物排放量在2015年后呈下降趋势,这与冀玄玄等<sup>[26]</sup>研究结果一致。2009—2023年,虽然作物播种面积增长,但化肥的利用效率也同步提升。青海省实施了《青海省化肥农药减量增效行动总体思路》,推动化肥和农药使用量较行动实施前均减少20%。雷俊华等<sup>[27]</sup>研究结果表明青海省受气候条件及开发程度等因素影响,化肥使用量和流失量较少,后续需进一步优化农业生产方式,推广适用于青海地区的高效施肥技术,以实现种植业的可持续绿色发展。

青海省农村生活源污染物排放量在2015年达到峰值后呈下降趋势,这一结果与殷炳超等<sup>[28]</sup>研究一致。农村生活源污染物排放量与农村人口及污水处理率相关,根据青海省统计年鉴数据显示,农村常住人口从2009年的 $3.72 \times 10^6$ 人增至2015年的 $3.97 \times 10^6$ 人,增加了6.72%,而同期开展生活污水处理的行政村比例从0.9%提升至1.3%,污水处理率长期低于2%。随着2018年《青海省农村人居环境整治三年行动方案》的推进,行政村生活污水处理比例迅速提高,污水处理能力显著增强,从而实现了农村生活源污染物排放量的持续下降。

青海省等标污染负荷总量呈上升趋势,畜禽养殖业为主要污染源,这与其在区域产业结构中的主导地位相符。TN始终为最主要污染物,原因在于等标污染负荷法通过考虑不同污染物的环境标准,能更准确地反映不同污染物对水环境的实际影响程度,而非简单地比较排放量大小。等标污染负荷引入了污染物的环境标准限值作为评价基准,其中TN执行的《地表水环境质量标准》中Ⅲ类标准,限值为 $1.0 \text{ mg/L}$ ,COD为 $20 \text{ mg/L}$ ,单位质量的TN要达到环境标准所需稀释的水体体积远高于COD,表明TN具有更强的潜在生态风险。青海省等标污染负荷结果与江军<sup>[29]</sup>对黄土高原地区农业面源污染等标负荷

结果一致,等标污染负荷总量呈上升趋势,畜禽养殖是主要污染源,TN为主要污染物。COD在等标污染负荷中占比上升的主要原因是畜禽粪便中有机物含量高,且随着养殖规模扩大,粪便处理设施未能同步配套,导致COD等标污染负荷迅速增加。

### 3.2 基于青海省关键控制因素的治理措施

青海省农业面源污染防治的关键在于加强畜禽养殖业的污染治理。《青海省第二次全国污染普查公报》表明,目前青海省的养殖形式以养殖户和散养为主,污染物削减率普遍较低,尤其是规模以下畜禽养殖户的污染物削减率普遍低于全省平均水平。因此,亟需推动分散养殖向规模化养殖转型,加强粪污的统一收集与集中处理,从源头上提高畜禽粪便利用率。同时,要重点关注畜禽养殖业TN和COD的排放,TN可采用介质吸附法、电化学法、生物处理等方法去除,COD的去除可采用絮凝沉淀法、Fenton氧化法、生物处理等方法<sup>[12]</sup>。针对秸秆污染,应重点推广秸秆还田与生物质资源化利用,发展秸秆沼气工程或秸秆成型燃料,减少露天堆放与焚烧。此外,应深化种养结合模式,构建“畜禽-粪肥-作物”循环系统,减少化肥施用量,提升资源利用效率,如推广粪污堆肥发酵技术,结合高寒地区特点采用保温材料和耐低温微生物菌剂,缩短堆肥周期<sup>[30]</sup>。此类措施可减少农业面源污染负荷,促进化肥减量,更能确保粪便与养殖污水经无害化处理后安全还田,最终构建种植业与畜牧业协同发展的良性生态循环系统,实现环境效益与资源利用的双重优化。

## 4 结论

(1) 2009—2023年青海省农业面源污染排放量呈持续增长趋势,从 $2.17 \times 10^5 \text{ t}$ 增至 $3.65 \times 10^5 \text{ t}$ ,增幅为67.9%。畜禽养殖业是主导污染源,其排放量占农业面源污染总排放量的80.21%~88.89%,对区域污染负荷的调控最为敏感,同时其等标污染负荷比为61.69%~75.78%,呈持续上升趋势,应作为优先控制的关键源。

(2) TN是潜在生态风险最高的首要污染物,其等标污染负荷占比为44.30%~50.61%,是风险防控的首要对象;COD的等标污染负荷比增长最快,为21.59%~29.37%,其环境影响不容忽视。

(3) 未来污染防治应聚焦畜禽养殖业,重点加强TN的深度治理以削减其环境风险;同时有效控制COD负荷的快速增长,协同推进秸秆资源化利用,构建“种养结合”的循环农业模式,实现区域农业面源污染的有效削减与水环境安全的根本保障。

## 参考文献(References)

- [1] 丘雯文, 钟涨宝, 李兆亮, 等. 中国农业面源污染排放格局的时空特征[J]. 中国农业资源与区划, 2019, 40(1): 26-34.  
Qiu Wenwen, Zhong Zhangbao, Li Zhaoliang, et al. Spatial-temporal variations of agricultural non-point source pollution in China [J]. Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning, 2019, 40(1): 26-34.
- [2] 杨林章, 冯彦房, 施卫明, 等. 我国农业面源污染治理技术研究进展[J]. 中国生态农业学报, 2013, 21(1): 96-101.  
Yang Linzhang, Feng Yanfang, Shi Weiming, et al. Review of the advances and development trends in agricultural non-point source pollution control in China [J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2013, 21(1): 96-101.
- [3] 吴豪, 虞孝感, 梅洁人. 青海省生态环境若干问题及其对策措施[J]. 地理学与国土研究, 2001, 17(3): 58-62.  
Wu Hao, Yu Xiaogan, Mei Jieren. Major eco-environmental problems in Qinghai Province and the corresponding countermeasures [J]. Geography and Territorial Research, 2001, 17(3): 58-62.
- [4] 李建勋, 李明万, 刘晓雨, 等. 渭河流域陕西段农业面源污染空间分布及特征分析[J]. 中国环境监测, 2024, 40(6): 122-132.  
Li Jianxun, Li Mingwan, Liu Xiaoyu, et al. Spatial distribution and characteristics analysis of agricultural non-point source pollution in Shaanxi section of the Weihe basin [J]. Environmental Monitoring in China, 2024, 40(6): 122-132.
- [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] 董蓓蓓, 马淑花, 曹宏斌, 等. 乌梁素海流域污染现状分析及防治对策[J]. 安徽农业科学, 2011, 39(17): 10402-10405.  
Dong Beibei, Ma Shuhua, Cao Hongbin, et al. Analysis and countermeasures of pollution in Wuliangshuai basin [J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2011, 39(17): 10402-10405.
- [7] Zou Lilin, Liu Yansui, Wang Yongsheng, et al. Assessment and analysis of agricultural non-point source pollution loads in China: 1978—2017 [J]. Journal of Environmental Management, 2020, 263: 110400.
- [8] 贾陈忠, 乔扬源. 基于等标污染负荷法的山西省农业面源污染特征研究[J]. 中国农业资源与区划, 2021, 42(3): 141-149.  
Jia Chenzhong, Qiao Yangyuan. The characteristics of agricultural non-point source pollution in Shanxi Province based on equivalent pollution load method [J]. Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning, 2021, 42(3): 141-149.
- [9] 张亚丽. 青海省农业面源污染现状及其防治对策[J]. 青海科技, 2007, 14(2): 47-50.  
Zhang Yali. Present situation of agricultural non-point source pollution in Qinghai Province and its control countermeasures [J]. Qinghai Science and Technology, 2007, 14(2): 47-50.
- [10] 尤李俊, 李润杰, 王少丽, 等. 湟水流域农业面源污染现状及对策[J]. 农业工程, 2019, 9(5): 44-49.  
You Lijun, Li Runjie, Wang Shaoli, et al. Current situation and countermeasures of agricultural non-point source pollution in Huangshui River basin [J]. Agricultural Engineering, 2019, 9(5): 44-49.
- [11] 赖斯芸, 杜鹏飞, 陈吉宁. 基于单元分析的非点源污染调查评估方法[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2004, 44(9): 1184-1187.  
Lai Siyun, Du Pengfei, Chen Jining. Evaluation of non-point source pollution based on unit analysis [J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2004, 44(9): 1184-1187.
- [12] 陶园, 王少丽, 管孝艳, 等. 青海省农业面源污染源特征分析[J]. 农业工程学报, 2019, 35(10): 164-172.  
Tao Yuan, Wang Shaoli, Guan Xiaoyan, et al. Characteristic analysis of non-point source pollution in Qinghai Province [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2019, 35(10): 164-172.
- [13] 马国霞, 於方, 曹东, 等. 中国农业面源污染物排放量计算及中长期预测[J]. 环境科学学报, 2012, 32(2): 489-497.  
Ma Guoxia, Yu Fang, Cao Dong, et al. Calculation of agricultural non-point source pollution emission in China and its long-term forecast [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2012, 32(2): 489-497.
- [14] 韩鲁佳, 闫巧娟, 刘向阳, 等. 中国农作物秸秆资源及其利用现状[J]. 农业工程学报, 2002, 18(3): 87-91.  
Han Lujia, Yan Qiaojuan, Liu Xiangyang, et al. Straw resources and their utilization in China [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2002, 18(3): 87-91.
- [15] 李正鹏. 青海省农作物种植结构和产量变化及秸秆资源估算[J]. 青海农林科技, 2022(3): 52-56.  
Li Zhengpeng. Evolution of crop planting structure and yield and estimation of straw resources in Qinghai Province [J]. Science and Technology of Qinghai Agriculture and Forestry, 2022(3): 52-56.
- [16] 吴继忠. 青海省农作物秸秆资源调查[J]. 青海草业, 2011, 20(3): 45-47.  
Wu Jizhong. Investigation of straw resource in Qinghai Province [J]. Qinghai Prataculture, 2011, 20(3): 45-47.

- [17] 常晓敏,王少丽,管孝艳,等. 湟水流域典型区农业面源污染特征解析及空间格局[J]. 灌溉排水学报, 2023, 42(6):81-88.  
Chang Xiaomin, Wang Shaoli, Guan Xiaoyan, et al. Spatiotemporal distribution of nonpoint source pollution from agriculture in the Huangshui river basin [J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2023, 42(6):81-88.
- [18] 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.  
Wang Fanghao, Ma Wenqi, Dou Zhengxia, et al. The estimation of the production amount of animal manure and its environmental effect in China [J]. China Environmental Science, 2006, 26(5):614-617.
- [19] 王楠,郝贝贝,张思毅,等. 1991—2021年广东省农业面源污染源特征分析[J]. 农业工程学报, 2023, 39(9):190-200.  
Wang Nan, Hao Beibei, Zhang Siyi, et al. Agricultural non-point source pollution in Guangdong Province of China from 1991 to 2021 [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2023, 39(9):190-200.
- [20] Su Mingyue, Fan Min, Song Tao, et al. Spatio-temporal characteristics and multi-scale risk identification of pollution load based on sensitivity analysis in small watersheds located in Tuojiang River basin, China [J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2024, 196(9):803.
- [21] 叶飞,卞新民,胡大伟,等. 江苏省农业非点源污染地区差异评价与控制对策[J]. 水资源保护, 2006, 22(6):86-88.  
Ye Fei, Bian Xinmin, Hu Dawei, et al. Regional difference and countermeasures of agricultural non-point source pollution in Jiangsu Province [J]. Water Resources Protection, 2006, 22(6):86-88.
- [22] 刘玉莹,范静. 我国畜禽养殖环境污染现状、成因分析及其防治对策[J]. 黑龙江畜牧兽医(下半月), 2018(4):19-21.  
Liu Yuying, Fan Jing. Present situation, cause analysis and control countermeasures of environmental pollution in livestock and poultry breeding in China [J]. Heilongjiang Animal Science and Veterinary Medicine, 2018(4):19-21.
- [23] 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[J]. 中国农业资源与区划, 2019, 40(1):35-41.  
Zhou Fang, Jin Shuqin, Zhang Hui. Spatial differences and distribution characteristics of agricultural non-point source pollution of TN and TP in Tibet [J]. Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning, 2019, 40(1):35-41.
- [24] 李万栋. 青海省农作物秸秆综合利用存在的问题及对策[J]. 青海畜牧兽医杂志, 2023, 53(3):61-64.  
Li Wandong. Problems and countermeasures of comprehensive utilization of crop straw in Qinghai Province [J]. Chinese Qighai Journal of Animal and Veterinary Sciences, 2023, 53(3):61-64.
- [25] 彭春艳,罗怀良,孔静. 中国作物秸秆资源量估算与利用状况研究进展[J]. 中国农业资源与区划, 2014, 35(3):14-20.  
Peng Chunyan, Luo Huailiang, Kong Jing. Advance in estimation and utilization of crop residues resources in China [J]. Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning, 2014, 35(3):14-20.
- [26] 冀玄玄,姜军松. 中国化肥面源污染的时空特征及其影响因素:基于1997—2020年的省级面板数据[J]. 浙江农业学报, 2024, 36(5):1185-1198.  
Ji Xuanxuan, Jiang Junsong. Spatial-temporal characteristics and influencing factors of non-point source pollution of chemical fertilizers in China: Based on provincial panel data from 1997 to 2020 [J]. Acta Agriculturae Zhejiangensis, 2024, 36(5):1185-1198.
- [27] 雷俊华,苏时鹏,余文梦,等. 中国省域化肥面源污染时空格局演变与分组预测[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2020, 28(07):1079-1092.  
Lei Junhua, Su Shipeng, Yu Wenmeng, et al. Temporal and spatial pattern evolution and grouping prediction of non-point source pollution of chemical fertilizers in China [J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2020, 28(07):1079-1092.
- [28] 殷炳超,赵琰鑫. 湟水流域水污染源排放清单及空间分析研究[J]. 环境保护科学, 2022, 48(04):68-73.  
Yin Bingchao, Zhao Yanxin. Discharge list of water pollution source and spatial analysis in Huangshui River basin [J]. Environmental Protection Science, 2022, 48(04):68-73.
- [29] 江军. 黄土高原地区农业面源污染时空特征及与经济发展关系研究[D]. 陕西西安:陕西师范大学, 2018.  
Jiang Jun. Spatiotemporal characteristics of agricultural non-point source pollution and its relationship with economic development in the Loess Plateau region [D]. Xi'an, Shaanxi: Shaanxi Normal University, 2018.
- [30] 徐圣君,王华彩,姜参参,等. 畜禽养殖废水生物处理技术研究进展[J]. 环境科学与技术, 2021, 44(增刊2):153-162.  
Xu Shengjun, Wang Huacai, Jiang Cancan, et al. Research progress on biological treatment technology of livestock and poultry breeding wastewater [J]. Environmental Science & Technology, 2021, 44(S2):153-162.