

基于清单算法的区域温室气体排放特征分析

——以四川省为例*

李乔楚¹ 陈军华¹ 张鹏²

(1.西南石油大学经济管理学院,四川 成都 610500;2.西南石油大学土木工程与测绘学院,四川 成都 610500)

摘要 从能源活动、工业生产、农业活动、林业活动和废弃物处置 5 个方面构建四川省温室气体排放清单,立足部门主体异质性和温室气体品种异质性双重视角科学研判温室气体排放特征并界定关键排放来源。结果表明:1)能源活动是温室气体排放首要贡献源,能源加工转换和终端能源消费是关键排放领域,区域电力交易在保障能源供应安全的同时间接减缓排放强度。2)工业生产中,四川省作为水泥生产大省带动行业 CO₂ 排放占据主导;电炉钢产业示范性发展推动钢铁生产碳减排;资源回收利用导致玻璃生产 CO₂ 排放量较小;N₂O 排放来自硝酸生产的高温催化反应。3)农业活动中,动物肠道发酵 CH₄ 排放占据主导,粪便管理 N₂O 排放较显著;水稻种植 CH₄ 排放受到规模效应和有机物投入的综合影响。4)林业活动中,森林碳汇对温室效应缓解效果显著,而 2021 年由于病虫害高发致使虫灾造成的碳库减少量陡增。5)废弃物处置温室气体排放贡献较小,且主要来源于固体废弃物焚烧处理。

关键词 清单算法 温室气体 排放特征 四川省 部门差异性

DOI:10.15985/j.cnki.1001-3865.2024.04.015

Analysis of regional greenhouse gas emission characteristics based on inventory accounting method: a case study of Sichuan Province LI Qiaochu¹, CHEN Junhua¹, ZHANG Peng². (1. School of Economics and Management, Southwest Petroleum University, Chengdu Sichuan 610500; 2. School of Civil Engineering and Geomatics, Southwest Petroleum University, Chengdu Sichuan 610500)

Abstract: The greenhouse gas emission inventory of Sichuan Province was established from five aspects: energy activities, industrial production, agricultural activities, forestry activities and waste disposal. Based on the dual perspectives of departmental heterogeneity and greenhouse gas variety heterogeneity, the emission characteristics of greenhouse gas were scientifically judged and the key emission sources were determined. The results showed that: 1) energy activities were the primary contribution source of greenhouse gas emission in Sichuan Province. Energy processing and conversion, as well as industrial terminal energy consumption, were key areas for carbon emissions. Regional electricity trading could indirectly reduce the intensity of carbon emissions while ensuring the safety of energy supply. 2) In industrial production, due to Sichuan being a major province in cement production, CO₂ emission from cement industry played a leading role. The demonstration development of electric furnace steel industry promoted carbon emission reduction in steel production. The recycling and utilization of resources resulted in low CO₂ emissions from glass production. N₂O emission mainly came from the high-temperature catalytic reaction of nitric acid production. 3) In agricultural activities, CH₄ emissions from animal intestinal fermentation were dominant, and N₂O emissions from animal manure management were significant. CH₄ emissions from rice cultivation were comprehensively affected by scale effects and organic matter inputs. 4) In forestry activities, forest carbon sink had a significant effect on alleviating greenhouse effect. In 2021, due to the high incidence of pests and diseases, the reduction of carbon sink caused by forest pest infestation increased sharply. 5) The contribution of greenhouse gas emissions from waste disposal was small, and it mainly came from waste incineration.

Keywords: inventory accounting method; greenhouse gas; emission characteristics; Sichuan Province; departmental differences

据世界气象组织最新发布的信息显示,2022 年全球平均温度较工业化前平均水平高出约 1.15 °C^[1]。气候变化和全球变暖成为 21 世纪人类面临的巨大挑战,通过诱发海平面上升、极端气候事件、

第一作者:李乔楚,男,1995 年生,博士,讲师,主要从事能源低碳发展、石油工程管理等研究。

* 国家社会科学基金西部项目(No.22XGL019);国家社会科学基金重大项目(No.22&ZD105)。

土地荒漠化等危害,改变世界的陆地、淡水和海洋生态系统^[2]。政府间气候变化专门委员会(IPCC)发布报告指出,全球气候变暖主要归因于人类活动造成的温室气体排放量上升。中国目前尚处于“经济上升期”和“排放达峰期”^[3],应当积极开展应对气候变化和温室气体减排的相关举措。为推进中国低碳发展进程,准确构建温室气体排放清单是科学界定碳排放关键领域的重要前提^[4]。

国内外学者针对区域温室气体排放特征已开展了部分研究,但现有研究视角主要集中于能源活动、工业生产、农业活动等单一部门的排放特征分析^[5-8],因而研究结果无法体现多元部门间要素异质性造成的温室气体排放特征差异,不利于统筹全局视角研判关键排放来源;与此同时,现有研究对象主要集中于京津冀、长三角、粤港澳等中东部城市群^[9-12],少有研究关注成渝双城经济圈等西部地区的温室气体排放轨迹。四川省作为我国“清洁能源示范省”,是长江上游重要生态屏障和水源涵养地,同时也是西部地区的经济社会发展中心,应当立足自身的资源禀赋优势,为西部乃至中国低碳蓝图的绘制做出积极贡献^[13]。基于此,本研究立足五大单元(能源活动、工业生产、农业活动、林业活动和废弃物处置)和3类温室气体(CO₂、CH₄和N₂O)构建温室气体排放核算方法体系,结合四川省“经济—社会—环境—能源”现实发展的实际数据构建2021年温室气体排放清单,并立足部门主体异质性和温室气体品种异质性双重视角科学研判排放特征并界定关键排放来源,以期明确四川省减污降碳工作的有效抓手和着力点,为各级政府制定“碳达峰”“碳中和”中长期目标、发展思路和重点领域提供理论指引。

1 研究方法

1.1 研究对象与数据来源

温室气体是指大气中能吸收并释放红外线辐射的气体,是温室效应产生的主要诱因^[14]。其中,CO₂、CH₄和N₂O造成的热辐射效应在温室气体辐射总量中占比高达80%,因此主要核算上述3类温室气体的排放水平。以四川省为例,将主要排放源划分为五大单元,立足省级层面测算温室气体排放清单。其中,温室气体排放核算的基础活动数据来源于2022年的《中国统计年鉴》《中国能源统计年鉴》《中国林业和草原统计年鉴》《中国环境统计年鉴》《世界钢铁统计数据》《四川统计年鉴》《四川省生态环境状况公报》等;排放因子数据来源于IPCC发

布的清单指南(2019修订版)^[15]、国家发展和改革委员会发布的《省级温室气体清单编制指南(试行)》、国家生态环境部发布的中国区域电网基准线排放因子等。

1.2 温室气体排放核算方法

1.2.1 能源活动

1) 燃料燃烧

能源加工转换和终端能源消费过程中的化石燃料燃烧是温室气体关键排放源,核算模型见式(1)。

$$G_{fc} = \sum_i Q_{fc,i} \times N_{fc,i} \times E_{fc,i} \quad (1)$$

式中: G_{fc} 为燃料燃烧温室气体排放量,万t; $Q_{fc,i}$ 为第*i*类燃料消费量,万t; $N_{fc,i}$ 为第*i*类燃料净发热值,kJ/kg; $E_{fc,i}$ 为第*i*类燃料燃烧温室气体排放因子,kg/kJ。

2) 煤炭采掘

煤生成的地质过程会产生煤层气并封固于煤层中,直到采掘作业开展后,煤层暴露和破碎时溢散到大气中,综合考虑地下采掘过程的CO₂和CH₄排放,以及采后过程(处理、加工和输送等)的CH₄排放,核算模型见式(2)。

$$G_{cm} = Q_{cm} \times E_{cm} \times K \quad (2)$$

式中: G_{cm} 为煤炭采掘温室气体排放量,万t; Q_{cm} 为煤炭生产量,万t; E_{cm} 为煤炭采掘温室气体排放因子,包括地下采掘和采后两类情景,m³/t; K 为在20℃和标准大气压下温室气体的密度,t/m³。

3) 区域电力交易

燃料燃烧单元已将电、热生产等能源加工转换过程的温室气体排放纳入核算总量中,考虑到热力基本属于本地供应消纳,而本地发电可能通过外输满足临近区域的用能需求,遵循“消费责任排放”原则,以实际消费主体作为CO₂排放的归属主体,因此需要核算电力外省(区、市)调入与省内调出产生的间接CO₂排放,核算模型见式(3)。

$$G_{et} = (Q_{in} - Q_{out}) \times E_{et} \quad (3)$$

式中: G_{et} 为区域电力交易CO₂排放量,万t; Q_{in} 为电力外省(区、市)调入量,kW·h; Q_{out} 为电力省内调出量,kW·h; E_{et} 为区域电网基准CO₂排放因子,万t/(kW·h)。

1.2.2 工业生产

工业部门温室气体排放除了来源于终端能源消费,还形成于生产原材料参与的化学或物理转化过程。

1) 水泥生产

水泥生产温室气体排放主要来源于熟料这一球

状中间产品的化学反应,即主要成分碳酸钙被加热或煅烧成石灰时排放的CO₂,核算模型见式(4)。

$$G_{cp} = Q_{cp} \times C_{cp} \times E_{cp} \quad (4)$$

式中:G_{cp}为水泥生产CO₂排放量,万t;Q_{cp}为水泥生产量,万t;C_{cp}为熟料在水泥生产中的质量分数,%;E_{cp}为熟料生产CO₂排放因子,t/t。

2) 玻璃生产

玻璃生产温室气体排放来源于石灰石等原材料熔炼过程排放的CO₂,同时生产中还将使用回收废(碎)玻璃作为原料,在核算中应当去除此部分加料比例,核算模型见式(5)。

$$G_{gp} = Q_{gp} \times (1 - C_{gr}) \times E_{gp} \quad (5)$$

式中:G_{gp}为玻璃生产CO₂排放量,万t;Q_{gp}为玻璃生产量,万t;C_{gr}为玻璃生产原料中废(碎)玻璃质量分数,%;E_{gp}为玻璃生产CO₂排放因子,t/t。

3) 硝酸生产

硝酸主要用作含氮化肥生产的原材料,其生产过程中的温室气体排放来源于氨气高温催化氧化反应排放的N₂O,核算模型见式(6)。

$$G_{nap} = Q_{nap} \times E_{nap} \quad (6)$$

式中:G_{nap}为硝酸生产N₂O排放量,万t;Q_{nap}为硝酸生产量,万t;E_{nap}为硝酸生产N₂O排放因子,t/t。

4) 电石生产

电石生产温室气体排放来源于含碳原材料的化学反应,具体包括碳化硅、碳化钙等碳化物生产时排放的CO₂和CH₄,核算模型见式(7)。

$$G_{cep} = Q_{cep} \times E_{cep} \quad (7)$$

式中:G_{cep}为电石生产温室气体排放量,万t;Q_{cep}为电石生产量,万t;E_{cep}为电石生产温室气体排放因子,t/t。

5) 钢铁生产

钢铁生产温室气体排放一方面来源于碱性氧气转炉、电弧炉和开炉炼钢三大炼钢过程,另一方面来源于未转换为钢的生铁生产过程,核算模型分别见式(8)和式(9)。

$$G_{sm} = Q_{BOF} \times E_{BOF} + Q_{EAF} \times E_{EAF} + Q_{OHF} \times E_{OHF} \quad (8)$$

$$G_{pim} = Q_{pim} \times E_{pim} \quad (9)$$

式中:G_{sm}为炼钢过程CO₂排放量,万t;Q_{BOF}、Q_{EAF}、Q_{OHF}分别为碱性氧气转炉、电弧炉和开炉炼钢的粗钢生产量,万t;E_{BOF}、E_{EAF}、E_{OHF}分别为碱性氧气转炉、电弧炉和开炉炼钢过程CO₂排放因子,t/t;G_{pim}为生铁生产过程CO₂排放量,万t;Q_{pim}为生铁生产

量,万t;E_{pim}为生铁生产过程CO₂排放因子,t/t。

1.2.3 农业活动

1) 水稻种植

水稻种植温室气体排放来源于稻田土壤有机质厌氧分解产生的CH₄,并通过作物的传输作用释放至大气,核算模型见式(10)。

$$G_{rp} = A_{rp} \times E_{rp} \times T \quad (10)$$

式中:G_{rp}为水稻种植CH₄排放量,万t;A_{rp}为水稻年度播种面积,万hm²;E_{rp}为水稻种植CH₄日排放因子,t/(hm²·d);T为水稻年度种植期,d。

2) 氮肥施用

氮肥施用温室气体排放一方面来源于人为氮投入土壤的N₂O直接排放,另一方面来源于挥发的NH₃、氮氧化物(NO_x)及其产物NH₄⁺和NO₃⁻再沉积回到土壤,和氮经溶淋、径流后以NO₃⁻的形式从土壤中释放所导致的N₂O间接排放,核算模型分别见式(11)和式(12)。

$$G_{nfa,dir} = Q_{nfa} \times E_{nfa} \times \frac{44}{28} \quad (11)$$

$$G_{nfa,indir} = Q_{nfa} \times F_{vs} \times E_{vs} \times \frac{44}{28} + Q_{nfa} \times F_{lr} \times E_{lr} \times \frac{44}{28} \quad (12)$$

式中:G_{nfa,dir}、G_{nfa,indir}分别为氮肥施用直接、间接N₂O排放量,万t;Q_{nfa}为氮肥年度施用量,万t;E_{nfa}为氮肥施用过程氮排放因子,t/t;F_{vs}为土壤中以NH₃、NO_x形式挥发沉积的氮肥质量分数,%;F_{lr}为土壤中通过溶淋和径流损失的氮肥质量分数,%;E_{vs}为氮挥发和沉积过程氮排放因子,t/t;E_{lr}为氮溶淋和径流过程氮排放因子,t/t。

3) 动物肠道发酵

动物肠道发酵温室气体排放来源于草食家畜生理活动的副产物,即微生物分解碳水化合物时排放的CH₄。考虑到反刍家畜肠道结构能促成广泛的日粮肠道发酵,从而成为CH₄主要排放源,因此选取牛和羊作为核算对象,同时考虑饲养量较大的非反刍牲畜猪的排放效应,核算模型见式(13)。

$$G_{aif} = \sum_j N_j \times E_{aif,j} \quad (13)$$

式中:G_{aif}为动物肠道发酵CH₄排放量,万t;N_j为第j类牲畜饲养量,万头(或万只);E_{aif,j}为第j类牲畜肠道发酵CH₄排放因子,t/头(或t/只)。

4) 动物粪便管理

动物粪便管理温室气体排放来源于厌氧条件下粪便降解排放的CH₄和粪肥中所含氮素通过硝化

和反硝化作用排放的 N_2O , 选取猪、马、牛、羊等家畜和家禽作为核算对象, 核算模型见式(14)和式(15)。

$$G_{amm} = \sum_j N_j \times E_{amm,j} \quad (14)$$

$$G_{amn} = \sum_j N_j \times Q_{amn,j} \times E_{amn,j} \quad (15)$$

式中: G_{amm} 、 G_{amn} 分别为动物粪便管理 CH_4 、 N_2O 排放量, 万 t; $E_{amm,j}$ 为第 j 类牲畜粪便管理 CH_4 排放因子, t/头(或 t/只); $Q_{amn,j}$ 为第 j 类牲畜年度氮排泄量, t/头(或 t/只); $E_{amn,j}$ 为第 j 类牲畜粪便管理 N_2O 排放因子, t/t。

1.2.4 林业活动

植物生物量构成地球生态系统的一种重要碳库, 林业活动温室气体排放主要来源于生物量碳库变化。

1) 生物量增长

生物量增长引起的年度碳库增加集中于与木本植物和树相关的生物量变化, 核算模型见式(16)。

$$G_{bg} = A_{bg} \times Q_{bg} \times P_{cf} \times \frac{44}{12} \quad (16)$$

式中: G_{bg} 为生物量增长引起的年度碳库增加量, 万 t; A_{bg} 为林业用地面积, 万 hm^2 ; Q_{bg} 为平均生物增长量, t/ hm^2 ; P_{cf} 为干物质中碳的质量分数, %。

2) 木材采伐

木材采伐将造成大量碳流失并进一步导致年度碳库减少, 核算模型见式(17)。

$$G_{wh} = H_{wh} \times B_{cef} \times (1+R) \times P_{cf} \times \frac{44}{12} \quad (17)$$

式中: G_{wh} 为木材采伐引起的年度碳库减少量, 万 t; H_{wh} 为木材产量, 万 m^3 ; B_{cef} 为单位木材采伐量对应的生物清除量, t/ m^3 ; R 为地下部生物量与地上部生物量的质量分数, %。

3) 自然扰乱

自然扰乱引发的年度碳库减少集中于森林火灾、虫灾造成的碳损失, 核算模型见式(18)。

$$G_{nd} = A_{nd} \times B_{nd} \times (1+R) \times P_{cf} \times F_{nd} \times \frac{44}{12} \quad (18)$$

式中: G_{nd} 为自然扰乱引起的年度碳库减少量, 万 t; A_{nd} 为受自然扰乱影响的面积, 万 hm^2 ; B_{nd} 为受扰乱地区平均地上生物量, t/ hm^2 ; F_{nd} 为火灾、虫灾造成的损失生物量在总量中的占比, %。

1.2.5 废弃物处置

1) 固体废弃物处置

固体废弃物处置温室气体排放一方面来源于废

弃物中矿物碳在焚化和露天燃烧期间氧化产生的 CO_2 , 另一方面来源于厌氧条件下填埋处理过程中有机材料降解产生的 CH_4 , 核算模型分别见式(19)和式(20)。

$$G_{swi} = Q_{swi} \times D_m \times P_{cf} \times F_{cf} \times O_x \times \frac{44}{12} \quad (19)$$

$$G_{swl} = (Q_{swl} \times E_{swl} - S) \times (1 - O_x) \quad (20)$$

式中: G_{swi} 、 G_{swl} 分别为固体废弃物焚烧处理 CO_2 、 CH_4 排放量, 万 t; Q_{swi} 为焚烧处理量, 万 t; D_m 为废弃物中干物质质量分数, %; F_{cf} 为总含碳量中矿物碳质量分数, %; O_x 为氧化因子; Q_{swl} 为填埋处理量, 万 t; E_{swl} 为填埋处理 CH_4 排放因子, t/t; S 为 CH_4 回收量, 万 t。

2) 生活污水处理

生活污水处理温室气体排放一方面来源于家用废水无氧处理过程产生的 CH_4 , 另一方面来源于处理厂直接排放和将废水排入下水道、湖泊或海洋等间接排放产生的 N_2O , 核算模型分别见式(21)和式(22)。

$$G_{dstm} = Q_{tds} \times \sum_m \sum_n (U_m \times T_{m,n} \times E_{dstm,n}) \quad (21)$$

$$G_{dstn} = N_{ds} \times E_{dstn} \times \frac{44}{28} \quad (22)$$

式中: G_{dstm} 为生活污水处理 CH_4 排放量, 万 t; Q_{tds} 为生活污水中含有机物量, 万 t; m 为人口群体类型, 包括城镇和农村人口; n 为处理/排放途径或系统, 包括化粪池、厕所、下水道等; U_m 为第 m 类人口群体数量在地区常住人口总量中的占比, %; $T_{m,n}$ 为第 m 类人口群体利用第 n 类处理/排放途径或系统的程度; $E_{dstm,n}$ 为第 n 类处理/排放途径或系统的生活污水处理 CH_4 排放因子, t/t; G_{dstn} 为源自生活污水的 N_2O 排放量, 万 t; N_{ds} 为生活污水含氮量, 万 t; E_{dstn} 为源自生活污水的氮排放因子, t/t。

3) 工业废水处理

工业废水处理温室气体排放来源于含碳废水在厌氧处理中排放的 CH_4 , 核算模型见式(23)。

$$G_{iwt} = T_{iw} \times B_{iwt} \times M_{is} \quad (23)$$

式中: G_{iwt} 为工业废水处理 CH_4 排放量, 万 t; T_{iw} 为工业废水含有机物量, 万 t; B_{iwt} 为最大 CH_4 产生能力, t/t; M_{is} 为 CH_4 修正因子。

2 四川省温室气体排放特征分析

依据构建的核算方法体系, 研究得到四川省

表 1 四川省 2021 年温室气体排放清单
Table 1 Greenhouse gas emissions inventory of Sichuan Province in 2021 万 t

一级单元	二级单元	三级单元	四级单元	CO ₂ 排放量	CH ₄ 排放量	N ₂ O 排放量
能源活动	燃料燃烧	能源加工转换	火力发电	4 571.88	0.05	0.07
			供热	725.43	0.01	0.01
			农、林、牧、渔业	486.00	0.02	0
			工业	13 491.84	0.18	0.15
			建筑业	497.79	0.02	0
		终端能源消费	交通运输业	3 088.87	0.12	0.02
			商业	676.48	0.02	0
			其他服务业	687.56	0.02	0
			居民生活	2 914.19	0.09	0.02
			煤炭采掘	采掘过程	21.20	23.55
	采后过程	0	3.27	0		
区域电力交易	电力调入	1 479.54	0	0		
	电力调出	-12 161.77	0	0		
工业生产	水泥生产			5 708.35	0	0
	玻璃生产			48.32	0	0
	硝酸生产			0	0	0.05
	电石生产			58.62	0.59	0
	钢铁生产	炼钢	碱性氧气转炉	2 437.82	0	0
			电弧炉	89.05	0	0
			开炉	0	0	0
		生铁生产	2 824.20	0	0	
	水稻种植			0	29.29	0
	氮肥施用	直接排放	0	0	1.40	
间接排放		0	0	0.32		
农业活动	动物肠道发酵	猪	0	4.26	0	
		牛	0	43.93	0	
		羊	0	13.45	0	
	动物粪便管理	猪	0	17.79	10.83	
		马	0	0.12	0.93	
		牛	0	2.67	22.96	
		羊	0	0.79	1.16	
		家禽	0	0.91	0.19	
生物量增长			-7 713.90	0	0	
林业活动	木材采伐			327.24	0	0
	自然扰乱	森林火灾	2.67	0	0	
		森林虫灾	215.86	0	0	
废弃物处置	固体废弃物处置	填埋处理	0	0.46	0	
		焚烧处理	28.27	0	0	
	生活污水处理			0	10.25	0.04
工业废水处理			0	0.33	0	

2021 年温室气体排放清单,具体见表 1。

2.1 CO₂ 排放特征

2021 年四川省 CO₂ 排放总量 20 505.51 万 t, 其中碳源直接排放总量 40 381.18 万 t, 碳汇间接吸收总量为 -19 875.67 万 t。能源活动和工业生产的碳源直接排放量分别为 28 640.78 万、11 166.36 万 t, 在碳源直接排放总量中占比达到 70.93% 和 27.65%, 即为 CO₂ 主要贡献源, 这主要由于一方面

能源活动贯穿于国民经济发展的方方面面, 能源燃烧时的氧化反应以及石油天然气系统的溢散过程均将导致 CO₂ 的直接迅速排放; 另一方面, 装备制造、建筑材料、能源化工等为代表的工业始终是四川省支柱性产业和现代经济基础, 原材料在化学、物理转化过程中将释放大量温室气体。林业活动和废弃物处置过程中的碳源直接排放量相对较小, 分别仅为 545.77 万、28.27 万 t, 几乎可忽略不计。

对于能源活动,能源加工转换和终端能源消费 CO₂ 排放量分别为 5 297.31 万、21 842.73 万 t,由于能源消费涉及国民生产生活的众多行业,在高利用水平驱使下其对温室效应的贡献尤为显著。能源加工转换 CO₂ 排放中有 86.31% 集中于火力发电,同时考虑到常规电厂流失到环境中的能源比例往往高达 70%,即使是现代高效率电厂,其流失比例也约达 50%^[16],因此能源转化过程能耗引发的碳排放效应不容忽略。由图 1 可见,对于终端能源消费,以农、林、牧、渔业代表的第一产业 CO₂ 排放占比仅为 2.22%,这是由于其日常经营活动对能源依赖性较小,同时行业发展中林木、湿地等要素具备固碳效应;第二产业中工业 CO₂ 排放占比高达 61.77%,并成为终端消费首要排放源,这由于燃烧排放主要取决于燃料碳含量,工业生产依赖于煤炭、重质油品等高碳化石能源,同时具备高水平用能需求,消费规模和碳化比例较大,必然带动 CO₂ 排放同步增加;第三产业中交通运输业和居民生活也存在一定碳贡献,占比分别达到 14.14% 和 13.34%,这由于轿车、卡车乃至高铁、飞机等交通运输设施仍未与汽油、柴油等化石燃料消费脱钩,同时居民生活在采暖、炊事等领域的天然气消费水平仅次于工业部门。煤炭采掘 CO₂ 排放主要集中于地下开采时煤矿除气系统的高速率泄放过程^[17],而露天和废弃煤矿的排放效应相对较小,由于四川省资源禀赋呈现“缺煤”特征,探明资源储量仅为 126.92 亿 t,煤炭产量较小,从而带动溢散排放贡献相对较低,仅为 21.20 万 t。区域间电力调入与调出过程引发的 CO₂ 排放量分别为 1 479.54 万、-12 161.77 万 t,由此可知四川省电力交易过程有效间接减缓了区域碳排放强度,这得益于四川省域水力发电雄踞全国前列,2021 年发电总

量达到 3 531.40 亿 kW·h,其中 1 416.30 亿 kW·h 通过“西电东输”工程供给华中和华东地区的用能需求,在保障能源供应安全的同时助力全国低碳发展新格局形成。

对于工业生产,水泥、玻璃、电石和钢铁生产 CO₂ 排放量分别为 5 708.35 万、48.32 万、58.62 万、5 351.07 万 t,其中水泥生产以 51.12% 的占比占据主导地位,这由于四川省是水泥生产大省,2021 年产量达到 14 147.10 万 t,稳居西部第一,而水泥生产通过加热煅烧石灰石产生显著的 CO₂ 直接排放;钢铁生产 CO₂ 排放量虽然也超过 5 000 万 t,但与同产量规模的其他省份相比排放水平相对较低,这得益于四川省是全国电炉钢产业集中区域,短流程炼钢比例已达到 40% 左右,远高于全国平均水平的 10.60%,其“以钢炼钢”的生产原理省去铁矿石烧结还原过程,有助于减少近 60% 的能源消耗和 80% 的 CO₂ 排放^[18];玻璃和电石生产 CO₂ 排放水平较低,这一方面由于玻璃生产商通常采用部分回收的废玻璃(碎玻璃)作为原材料,且其在大批量生产中的比例高达 40%~60%,即通过资源节约间接降低熔炼过程约一半的 CO₂ 排放,另一方面四川省电石产量较低,2021 年仅占全国电石总产量的 1.48%,同时中国电石生产原料以氧化钙为主,经由电热法约 67% 的碳包含于电石产品中,仅有剩下不超过四成与过量氧气反应转化为 CO₂^[19]。

对于林业活动,林木连续生长引起的年度碳库增加 7 713.90 万 t,与木本植物相关的生物量构成生态系统的重要碳库,四川省森林碳汇对区域温室效应缓解效果显著,这主要得益于“十三五”期间积极推进大规模“绿化全川”行动,2021 年森林资源覆盖率达到 40.23%,远高于全国平均水平 22.96%。木材采伐、森林火灾、森林虫害等引起的年度碳库减少量分别为 327.24 万、2.67 万、215.86 万 t,上述离散事件的影响取决于不同年限特定地区的实际情况,通过将碳从活生物量碳汇转移到死有机物质池,引发 CO₂ 排放和生态系统碳构成的重新分配。具体来看,2021 年四川省木材产量为 302.65 万 m³,由于分散的经营方式和高额的采伐成本导致采伐限额空置率居高不下,故其引发的年度碳库减少量不甚显著;另外,在 2020 年森林火灾受害面积高达 1 487.20 hm² 的警示下,省域内着力开展“常态化”森林草原火灾防控工作,科学有序实施可燃物清除和计划烧除,积极推进督导检查、防火演练和信息化建设,助力 2021 年受灾面积控制于 239.20 hm²,

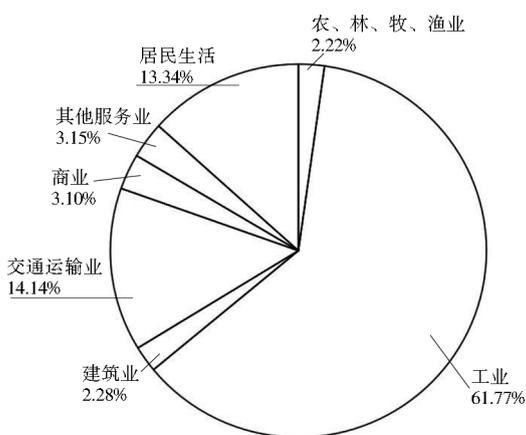


图 1 终端能源消费 CO₂ 排放构成

Fig.1 Composition of CO₂ emissions from terminal energy consumption

受害率仅为 0.01%，故其引发的碳库减少量几乎忽略不计；但与此同时，2021 年是四川省“病虫害高发年”，松材线虫、红火蚁等检疫性有害生物呈持续扩散趋势，林业有害生物成灾面积高达 64 473 hm²，相比于上一年的 1 220 hm² 增长 51.85 倍，其成因主要在于外来入侵物种的快速蔓延和本土生态脆弱区的固有缺陷^[20]。

对于废弃物处置，CO₂ 排放主要集中于固体废弃物焚烧处理过程，但排放量较小仅为 28.27 万 t，目前四川省生活垃圾无害化处理率已达到 99.99%，其中焚烧处理能力占比为 82.10%，无害化处理虽然可消除致癌气体、水体污染等危害，但高温焚烧氧化过程不可避免产生 CO₂ 排放，此时碳捕捉和储存技术成为控制温室气体排放的重要手段。

2.2 CH₄ 排放特征

2021 年四川省 CH₄ 排放总量为 152.19 万 t，其中农业活动排放量(113.21 万 t，占 74.39%)成为第一贡献源，能源活动和废弃物处置次之(占比分别为 17.97%和 7.25%)，工业生产可忽略不计，CH₄ 排放二级单元的具体构成见图 2。造成上述现象的主要原因为，农业活动中水稻种植和动物粪便管理的厌氧过程，以及动物肠道发酵过程是 CH₄ 排放的主要来源；能源活动中大部分碳通过氧化反应以 CO₂ 形式迅速排放而仅有少部分转化为 CH₄；工业生产 CH₄ 排放集中于电石生产，但省域产量水平较低，在规模效应影响下 CH₄ 排放水平同步较低。

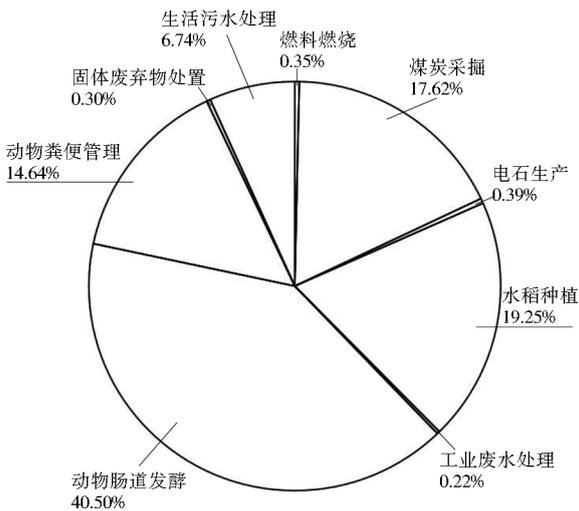


图 2 CH₄ 排放二级单元构成

Fig.2 Composition of secondary unit for CH₄ emissions

对于农业活动，动物肠道发酵 CH₄ 排放量为 61.64 万 t，并以农业活动 54.45%的占比占据主导地位，不同品种牲畜的排放水平排序为牛>羊>猪，这由于四川省是全国养牛第一大省，2021 年饲养量

为 830.51 万头，且羊饲养量也达到 1 511.69 万头，牛、羊等反刍动物具有瘤胃等膨胀室，能支持日粮的密集微生物发酵，最终导致肠道消化系统呈现高水平 CH₄ 排放率，猪等非反刍牲畜排放水平则相对较小。动物粪便管理 CH₄ 排放一方面取决于家畜粪便处置到液基系统(化粪池、池塘等)中的比例，即是否处于厌氧条件，另一方面受到系统温度和滞留时间的影响，在多元限制条件下其排放量(22.28 万 t)明显小于动物肠道发酵；不同品种牲畜的排序为猪>牛>家禽>羊>马，这由于四川省猪、牛饲养量较大，且牛粪便大多在肥育场中管理，猪粪便约 40%按液体管理，而马、羊和家禽粪便分布于牧场、草原、日常散施田间等“干”粪便管理系统中^[21]，因此排放群体和排放因子均相对较小。水稻种植 CH₄ 排放量为 29.29 万 t，在农业活动 CH₄ 排放量中占 25.87%，一方面四川省属于农业强省，同时也是中国十大水稻产量大省之一，CH₄ 排放具备规模效应；另一方面，为推动“天府粮仓”建设，省域内近年来积极开展增施有机肥、秸秆还田、种植绿肥等举措，有机物投入带动土壤内碳含量增加，同时西南地区的温暖气候和充足水分条件也均有助于温室气体的形成扩散，在上述因素综合影响下引发一定水平 CH₄ 排放。

对于能源活动，燃料燃烧和煤炭采掘 CH₄ 排放量分别为 0.53 万、26.82 万 t，且在煤矿排放中有 87.81%集中于采掘过程，仅有 12.19%发生于采后过程，这由于采掘操作期间将直接释放破碎煤层及周围储层中的 CH₄，而不依赖于氧化反应，而采后虽继续排放温室气体，但气体含量和排放速度相比于煤层破碎阶段显著较低^[22]。

对于废弃物处置，固体废弃物填埋处理、生活污水处理和工业废水处理 CH₄ 排放量分别为 0.46 万、10.25 万、0.33 万 t，其中生活污水处理 CH₄ 排放量以 92.84%的比例占据主导，这一方面是由于废水处理 CH₄ 排放取决于有机物含量，而 2021 年四川省城镇生活污水中排放的化学需氧量(COD)为 82.03 万 t，是工业废水 COD 排放量(2.68 万 t)的 30.61 倍，因此 CH₄ 排放量也同步较高；另一方面，近年来省域相继发布《关于加强城市建筑垃圾管理与资源化利用的指导意见》《四川省推进生活垃圾分类工作提质增效三年行动方案》等文件，积极开展垃圾分类回收和资源化处理(焚烧发电等)，在政策规制下固体废弃物填埋处理比例减少至 17.90%，可发生降解的废弃物原料总量较小，导致 CH₄ 排放水

平相应较低。

2.3 N₂O 排放特征

2021年四川省N₂O排放总量为38.15万t,其中农业活动N₂O排放量(37.79万t,占比99.06%)成为第一贡献源,能源活动、工业生产和固体废弃物处置N₂O排放量分别为0.27万、0.05万、0.04万t,数量级较小,几乎可忽略不计,N₂O排放二级单元的具体构成见图3。对于农业活动,氮肥施用和动物粪便管理N₂O排放量分别为1.72万、36.07万t,动物粪便管理占据主导,这由于粪便管理N₂O排放一方面来源于氨态氮转化成硝态氮的硝化作用,另一方面来源于厌氧条件下亚硝酸盐和硝酸盐转化的反硝化作用,在上述过程中尿素(家畜)和尿酸(家禽)等有机氮迅速形成NO_x,其具有高挥发特性故极易在周围空气中直接扩散;同时,无机氮可供量是土壤中N₂O形成的主控因素,氮肥施用等人为氮投入过程虽能补充土壤中的氮含量,但即使是直接排放也需经历氨基氧化或微生物还原等化学反应过程,且间接排放又进一步增加了再沉积、氮溶淋、径流等复杂过程,涉及大气、土体、生物等多元主体,故不确定性更大、排放水平较低。动物粪便管理中不同品种牲畜的N₂O排放水平排序为牛>猪>羊>马>家禽,这由于N₂O排放受到牲畜饲养数量、氮排泄量和排放因子的综合影响,其中氮排泄量取决于牲畜年摄取氮总量,四川省猪、牛饲养具有一定数量规模,同时牛等家畜需承担产肉、产奶、劳役等多重任务,含氮饲料摄取量较大且氮排泄量同步较大,而鸡等家禽体积小、采食量和消化率均较小,因此氮排泄量显著较小。

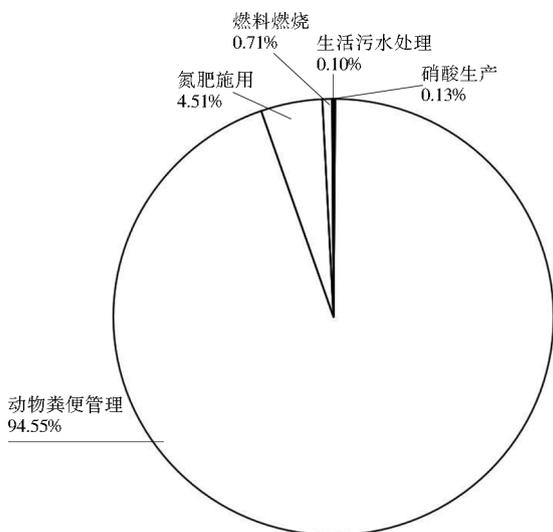


图3 N₂O排放二级单元构成

Fig.3 Composition of secondary unit for N₂O emissions

对于能源活动,N₂O排放仅作为化石燃料氧化反应的副产品。对于工业生产,N₂O排放主要集中于硝酸生产过程,即为高温催化反应的意外产物,但省域2021年硝酸产量仅为8.2万t。对于废弃物处置,N₂O排放主要集中于生活污水处理过程,但IPCC给出的生活污水处理N₂O缺省排放因子极小,仅为0.005 t/t(基于有限的现场数据)。在上述因素影响下,能源活动、工业生产和废弃物处置3个单元的N₂O排放水平均较低。

3 结论与建议

1) 能源活动是温室气体排放首要贡献源,能源加工转换和终端能源消费是关键排放领域,区域电力交易在保障能源供应安全的同时间接减缓排放强度。因此,未来四川省应积极聚焦发电等能源加工转换部门,工业、交通运输业、居民生活等终端能源消费部门,遵循“减煤、控油、增电、稳气、推广新能源”的整体思路,做好化石能源“减法”和可再生能源“加法”,积极开展“西气东输”“西电东送”等减排项目,统筹能源供给安全和能源低碳发展。

2) 工业生产中,四川省作为水泥生产大省带动水泥行业CO₂排放占据主导;四川省电炉钢产业的示范性发展有效控制了钢铁行业CO₂排放水平;资源回收利用导致玻璃生产CO₂排放较小;N₂O排放主要来源于硝酸生产的高温催化反应。因此,未来四川省应推动产业结构高端化,聚焦前沿,促进产业转型升级、低碳发展,一体化布局锂电关键材料、氢能、高性能工程塑料、工业废料综合利用等“新材料+新能源+生态环保”前沿产业;推动产业发展清洁化,利用工业固体废弃物等非碳酸盐原料替代常规水泥生产原料,推广新型钢铁材料、持续发挥全国电炉钢产业集中区优势。

3) 农业活动中,动物肠道发酵CH₄排放占据主导,粪便管理N₂O排放较显著;水稻种植CH₄排放受到作物种植的规模效应以及肥料等有机物投入的综合影响。因此,未来四川省应着力提升畜禽粪污综合利用率和资源化设施装备配套率,推动畜禽粪污稳定化、清洁化、资源化;重点提高农田土壤固碳能力,持续推广优良品种、绿肥种植和绿色高效栽培技术,促进农业由“碳源”向“碳汇”的生态系统转变。

4) 林业活动中,森林碳汇对省域温室效应的缓解效果显著;常态化风险防控有效降低了森林火灾引起的碳库减少量;2021年由于四川省病虫害高发

致使森林虫灾造成的碳库减少量陡增。因此,未来四川省应依托国土绿化、生态修复等工程支持森林碳汇项目建设,持续开展“常态化”森林草原火灾防控工作,积极推进督导检查、防灭火演练和信息化建设,做好松材线虫、红火蚁等检疫性有害生物的日常监测,结合森林抚育、提高林分质量,充分发挥林草碳汇对碳排放的对冲作用。

5) 废弃物处置温室气体排放贡献较小,CO₂ 排放主要来源于固体废弃物焚烧处理;处理有机物含量较高的生活污水时产生的 CH₄ 排放明显高于工业废水。因此,未来四川省应大力倡导节能降碳的生产方式和生活理念,提高城市生活垃圾减量化、无害化和资源化水平,持续推广“碳中和垃圾分类站”等创新性低碳基础设施建设,拓展生态保护领域的人口质量红利。

参考文献:

[1] BENTON T. Five times faster: rethinking the science, economics, and diplomacy of climate change[J]. *International Affairs*, 2023, 99(4): 1803-1804.

[2] LAINO E, IGLESIAS G. Extreme climate change hazards and impacts on European coastal cities: a review[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2023, 184: 113587.

[3] WU L P, ZHU Q Y. Impacts of the carbon emission trading system on China's carbon emission peak: a new data-driven approach[J]. *Natural Hazards*, 2021, 107(3): 2487-2515.

[4] 张萌, 曹国良, 张宜松. IPCC 情景下中国大陆区域排放清单预测[J]. *环境工程*, 2017, 35(9): 164-168.

[5] 刘春红, 郝学军, 刘枫. 北京市城市生活垃圾处理温室气体排放特征及减排策略[J]. *环境工程技术学报*, 2022, 12(4): 1041-1047.

[6] 郝汉, 马文林, 李思航. 河北省 2006—2020 年废弃物处理温室气体排放特征研究[J]. *环境污染与防治*, 2023, 45(8): 1108-1113.

[7] 谢婷, 张慧, 苗洁, 等. 湖北省农田生态系统温室气体排放特征与源/汇分析[J]. *农业资源与环境学报*, 2021, 38(5): 839-848.

[8] 胡怀敏, 左薇, 徐士元. 长江经济带交通能源碳排放脱钩效应及驱动因素研究[J]. *长江流域资源与环境*, 2022, 31(4): 862-877.

[9] 张正峰, 张栋. 基于社会网络分析的京津冀地区碳排放空间关联与碳平衡分区[J]. *中国环境科学*, 2023, 43(4): 2057-2068.

[10] 邹秀清, 孙学成, 葛天越, 等. 长三角地区碳排放差异、影响机理及碳达峰预测[J]. *长江流域资源与环境*, 2023, 32(3): 548-557.

[11] 宋庆彬, 汪中才. 澳门温室气体排放特征与减排策略研究[J]. *中国人口·资源与环境*, 2020, 30(7): 18-26.

[12] 郭嘉文, 徐媛倩, 沙青娥, 等. 广东省居民生活直接能源消费大气污染物与温室气体排放趋势研究[J]. *环境科学学报*, 2022, 42(7): 84-93.

[13] 李乔楚, 陈军华, 何京. 基于系统动力学-Visual Studio 集成模型的区域碳排放中长期变化趋势预测——以四川省为例[J]. *环境污染与防治*, 2022, 44(12): 1669-1675.

[14] 刘海艳, 于会彬, 王志刚. 粤港澳大湾区温室气体和大气污染物协同控制现状分析[J]. *环境工程技术学报*, 2023, 13(2): 455-463.

[15] IPCC. 2019 Refinement to the 2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories[R]. Kyoto: IGES, 2019.

[16] 王一坤, 徐晓光, 王栩, 等. 燃煤机组多源耦合发电技术及应用现状[J]. *热力发电*, 2022, 51(1): 60-68.

[17] 揭俐, 王忠, 余瑞祥. 中国能源开采业碳排放脱钩效应情景模拟[J]. *中国人口·资源与环境*, 2020, 30(7): 47-56.

[18] 姚同路, 吴伟, 杨勇, 等. “双碳”目标下中国钢铁工业的低碳发展分析[J]. *钢铁研究学报*, 2022, 34(6): 505-513.

[19] 王志强, 张浩. 电石生产企业碳排放核算与建议[J]. *中国资源综合利用*, 2023, 41(1): 177-184.

[20] 张学珍, 贺清雯, 黄季夏. 基于 Meta 分析的 1985—2018 年中国森林虫害的时空特征及其影响因素[J]. *地理科学进展*, 2023, 42(5): 960-970.

[21] 安济山, 万发春, 沈维军, 等. 多维度调控反刍动物甲烷减排的研究进展[J]. *动物营养学报*, 2022, 34(11): 6842-6850.

[22] 李乔楚, 张鹏, 陈军华. 四川省天然气产业安全—经济—环保耦合协调度研究——基于能源“不可能三角”视角[J]. *天然气技术与经济*, 2024, 18(1): 7-14.

编辑: 黄 苇 (收稿日期: 2023-11-13)