

DOI: 10.16861/j.cnki.zggc.2025.0694

甘肃省蔬菜废弃物污染风险及资源化潜力分析

王健¹, 王晶², 卢秀霞², 杨祎程², 郭艳娥², 汪建旭²

(1. 甘肃省农业生态与资源保护技术推广总站 兰州 730000; 2. 兰州现代职业学院 兰州 730300)

摘要: 为了确定甘肃省各县(区)蔬菜废弃物污染风险及资源利用潜力,以甘肃省 87 个县(区)为研究对象,通过文献整理、实地调研和数据分析,估算出各县(区)蔬菜废弃物的污染总负荷、污染总强度和污染风险,并结合各县(区)化肥施用折纯量,探究蔬菜废弃物的资源化利用潜力。结果表明,2023 年甘肃省蔬菜废弃物污染总负荷为 53.42 万 t,各县(区)蔬菜废弃物平均污染强度为 115.3 kg·hm⁻²。各县区中,榆中县、永昌县、红古区、安定区污染综合指数较高。若将 2023 年甘肃省各县(区)蔬菜废弃物肥料化利用,利用潜力可达 4.39 万 t,占 2023 年甘肃省化肥施用折纯总量的 5.73%。蔬菜废弃物肥料化利用潜力较高的县(区)主要有榆中县、安定区、永昌县、凉州区、甘谷县、临洮县、甘州区、肃州区、武山县、临泽县等甘肃省中部地区,建议实施推进蔬菜废弃物肥料化利用策略,以实现污染防控与资源增效的协同目标,对推进区域农业绿色可持续发展具有实践意义。

关键词: 蔬菜废弃物; 污染风险; 资源化; 潜力分析; 甘肃省

中图分类号: S63

文献标志码: A

文章编号: 1673-2871(2026)04-224-10

Analysis of pollution risks and resource utilization potential of vegetable waste in Gansu province

WANG Jian¹, WANG Jing², LU Xiuxia², YANG Yicheng², GUO Yan'e², WANG Jianxu²

(1. Gansu Provincial Agro-Ecological and Resource Conservation Technology Extension Station, Lanzhou 730000, Gansu, China; 2. Lanzhou Modern Vocational College, Lanzhou 730300, Gansu, China)

Abstract: To determine the pollution risk and resource utilization potential of vegetable waste in various counties (districts) of Gansu province, this study targeted 87 counties (districts). Through literature review, field surveys, and data analysis, the pollution load, pollution total intensity, and pollution risk of vegetable waste in each county (district) were estimated. Combined with the pure equivalent of chemical fertilizer application in each region, the potential for resource utilization of vegetable waste was explored. The results showed that in 2023, the total pollution load of vegetable waste in Gansu province was 534 200 t, with an average pollution intensity of 115.3 kg·hm⁻² across the counties (districts). Among them, Yuzhong county, Yongchang county, Honggu district and Anding district exhibited relatively high comprehensive pollution indices. If the vegetable waste in all counties (districts) of Gansu province were utilized as fertilizer, the potential fertilizer utilization of vegetable waste in 2023 could reach 43 900 t, accounting for 5.73% of the total pure equivalent of chemical fertilizer application in the same year. Counties (districts) with high potential for fertilizer-oriented utilization of vegetable waste are predominantly concentrated in central Gansu province, including Yuzhong county, Anding district, Yongchang county, Liangzhou district, Gangu county, Lintao county, Ganzhou district, Suzhou district, Wushan county, and Linze county. It is recommended to implement and advance strategies for fertilizer-oriented utilization of vegetable waste to achieve synergistic goals of pollution prevention and resource efficiency enhancement, which holds practical significance for promoting regional agricultural green and sustainable development.

Key words: Vegetable waste; Pollution risk; Resource utilization; Potential analysis; Gansu province

蔬菜产业是甘肃省重要的民生产业。近 10 年来,甘肃省蔬菜种植面积与产量均表现出持续稳定增长趋势^[1]。2023 年甘肃省蔬菜种植面积达 485 720 hm²,较 2019 年 381 250 hm²增长

收稿日期: 2025-09-28; 修回日期: 2025-11-23

基金项目: 甘肃省重点研发计划项目(25YFNA050); 现代寒旱特色农业科技支撑项目(KJZC-2025-26); 兰州市科技计划项目(2025-2-78); 甘肃省现代寒旱特色农业产业技术体系(GSARS-03-08)

作者简介: 王健,女,农艺师,研究方向为农业废弃物资源化利用。E-mail: wangjian81915@163.com

通信作者: 汪建旭,男,教授,研究方向为农业废弃物的资源化利用技术集成与示范。E-mail: wjx3729806@163.com

了27.40%^[2]。在蔬菜产量不断增加、消费者对蔬菜品相要求不断提高的同时,蔬菜废弃物的产生量也急剧增加。由于受区域经济、技术水平的限制,大量的蔬菜废弃物被随意堆积,极易腐烂发臭、导致蚊蝇滋生和病菌传播,在产生大量臭气的同时,常伴随含有氮、磷、钾等矿质元素的污水横流,易造成农业面源污染^[3-6]。

有研究发现,蔬菜废弃物区域协同处理能有效提高区域内资源化利用的总体效率^[7]。但目前蔬菜废弃物污染治理研究大多侧重于某一单独区域内的治理与管理研究^[8-10],而面源污染来源更为复杂,且迁移途径多样化^[11],致使科技工作者难以预测和控制,数据获取受到限制^[12]。为明确甘肃省蔬菜废弃物资源总量及其资源化利用潜力,本研究基于《甘肃统计年鉴》^[2]、实地调研数据及甘肃省农业农村厅主管部门提供的统计资料,获取了全省各县(区)的蔬菜种植面积、产量及蔬菜废弃物产生量等基础数据,系统测算了2019—2023年间甘肃省87个县(区)蔬菜废弃物的污染负荷。在此基础上,分析了蔬菜废弃物产出的时空分布特征,评估其对区域面源污染的潜在影响^[13-15],并结合各县(区)农业种植结构中化肥施用需求,进一步估算蔬菜废弃物的资源化利用潜力。以期对甘肃省各县(区)蔬菜废弃物资源化利用路径优化及蔬菜产业可持续发展提供数据支撑与决策参考。

1 试验方法

1.1 研究区概况

甘肃省位于黄土高原、内蒙古高原和青藏高原三大高原的交汇处,海拔在1000~5000 m,共有14个地级市,87个县(区)。年降水量为100~600 mm,年平均气温为9.3℃,无霜期120~220 d,年降雨量和无霜期均呈由东南向西北递减的趋势。土壤类型以黄绵土、灰棕漠土、冷钙土为主。

1.2 方法

1.2.1 蔬菜废弃物样品采集及分析方法 由调研可知,甘肃省主要种植的蔬菜类型为白菜类蔬菜,该类蔬菜在种植与处理过程中产废系数较高,导致的农业面源污染问题较为突出。为此,本研究选取新鲜白菜类蔬菜废弃物作为试验材料,于2023年7—9月在甘肃省榆中县高原夏菜集散地开展样品采集工作。样品采集采用完全随机设计方法,在基地内随机选取不同摊位作为采样点,每个摊位按

照四分法采集1份混合样品,每份样品质量不低于2 kg,共采集样品5份。样品采集后立即去除枯黄及病害部分,用去离子水清洗表面尘土,沥干水分后置于烘箱中,在105℃下杀青30 min,随后移至65℃恒温干燥至恒质量。将烘干样品经粉碎机粉碎,过60目筛,装入自封袋中密封,置于干燥器中保存备用。采用烘干法测定蔬菜废弃物含水率^[16],采用重铬酸钾氧化-外加热法测定有机质(OM)含量^[17],采用凯式定氮仪法测定总氮(TN)含量^[18],采用钼锑抗吸光度法测定总磷(TP)含量^[18],采用火焰原子吸收分光光度计法测定总钾(TK)含量^[18]。

1.2.2 甘肃省不同县(区)蔬菜废弃物产量估算 2019—2023年甘肃省蔬菜种植面积、产量(图1),以及2023年各县(区)蔬菜种植面积(图3)、产量(图4)、耕地面积等相关数据均来自2024年《甘肃统计年鉴》^[2];2019—2023年甘肃省蔬菜废弃物产生量、利用量、利用率(图2)以及2023年甘肃省各县(区)蔬菜废弃物产生量(图5)均由甘肃省农业农村厅相关部门提供。

1.2.3 蔬菜废弃物污染负荷估算 根据蔬菜废弃物含水率计算甘肃省各县(区)蔬菜废弃物污染负荷,分别计算区域内蔬菜废弃物污染总负荷(V ,万t)、蔬菜废弃物中OM的污染负荷(V_{OM} ,万t)、蔬菜废弃物中TN、TP、TK的污染负荷($V_{N/P/K}$,万t),计算公式如下^[7]:

$$V = P \times (1 - \alpha); \quad (1)$$

$$V_{OM} = V \times C_{OM}; \quad (2)$$

$$V_{N/P/K} = V \times C_{N/P/K}。 \quad (3)$$

式中: P 为区域内蔬菜废弃物产生量(万t), α 为蔬菜废弃物含水率(%), C_{OM} 为单位蔬菜废弃物中OM含量($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$), $C_{N/P/K}$ 为单位蔬菜废弃物中TN、TP、TK含量($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)。

1.2.4 蔬菜废弃物污染总强度及污染指数估算 甘肃省不同县(区)蔬菜废弃物产生量及其所蕴含的营养含量不同,耕地面积也有较大差异,故无法在同一基准上比较各县(区)蔬菜废弃物的污染总强度。因此在分析甘肃省不同县(区)蔬菜废弃物污染总强度时,用各县区的污染负荷分别除以各县(区)的耕地面积,得到甘肃省不同县(区)蔬菜废弃物污染总强度(D),进而求得其污染指数。计算公式如下^[7]:

$$D / (\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}) = \frac{V}{S} \times 10\,000; \quad (4)$$

$$\text{OM的污染强度 } D_{OM} / (\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}) = D \times C_{OM}; \quad (5)$$

TN、TP、TK 的污染强度 $D_{N/P/K}$ / (kg · hm⁻²)
 $= D \times C_{N/P/K}$; (6)

$$\text{污染综合指数 } Q_i = \frac{D_i - D_{\min}}{D_{\max} - D_{\min}} \quad (7)$$

式中: S 为耕地面积 (10³ hm²), D_i 为污染总强度第 i 县(区)的值, D_{\max} 为污染总强度最高县(区)的值, D_{\min} 为污染总强度最低县(区)的值。

1.2.5 蔬菜废弃物肥料化效益估算模型 计算公式如下^[19]:

$$\text{蔬菜废弃物所含养分总量 } F_v/\text{万 t} = V_{\text{OM}} + V_{\text{N/P/K}} ; \quad (8)$$

$$\text{蔬菜废弃物所含总养分化肥替代率 } P/\% = \frac{F_v}{F} \times 100 \quad (9)$$

式中: F 为化肥施用折纯量(万 t)。

1.3 数据分析

采用 Microsoft Excel 2010 进行数据处理和制图, 采用 ArcGIS 10.8 软件表征各县(区)蔬菜废弃物污染负荷及污染强度空间分布, 按相同权重进行各县(区)污染风险评价。

2 结果与分析

2.1 白菜类蔬菜废弃物主要养分含量

由表 1 可知, 白菜类蔬菜废弃物含水率达 93.20%, 有机质含量(w , 后同)为 569.00 g · kg⁻¹, 表明其富含易分解有机碳组分, 可作为优质碳源; 总氮、总磷和总钾含量分别为 34.07、13.88 和 34.15 g · kg⁻¹, 养分比例协调, 其中钾素含量相对突出, 呈现典型的高含水率与富营养化特征。

表 1 白菜类蔬菜废弃物养分含量
 Table 1 Main nutrient contents of Chinese cabbage vegetable wastes

指标 Index	w(有机质) w(总氮) w(总磷) w(总钾)				
	w(水分) Moisture content/% (g · kg ⁻¹)	Organic matter content/ (g · kg ⁻¹)	Total nitrogen content/ (g · kg ⁻¹)	Total phospho- rus content/ (g · kg ⁻¹)	Total potassi- um content/ (g · kg ⁻¹)
数值 Value	93.20	569.00	34.07	13.88	34.15

2.2 甘肃省蔬菜产量及废弃物资源量的年际变化特征

由图 1、图 2 可知, 2019—2023 年甘肃省的蔬菜种植面积、产量及废弃物产生量均呈上升趋势。自 2019 年以来, 甘肃省蔬菜种植面积及产量平均以每年 2.09 万 hm² 和 86.78 万 t 的速度增加, 2023

年蔬菜种植面积及产量较 2019 年分别增加了 27.40% 和 31.24%。随着甘肃省蔬菜种植面积及蔬菜产量的增加, 蔬菜废弃物产生量及利用量也在逐年增加, 2023 年蔬菜废弃物产生量和利用量分别达到了 992.9 万 t 和 537.2 万 t, 较 2019 年分别增加了 22.26% 和 47.04%。随着甘肃省政府对黄河流域面源污染问题越来越重视, 蔬菜废弃物利用技术推广范围越来越大, 技术水平不断提高, 蔬菜废弃物利用率也从 2019 年的 45.66% 提升至 2023 年的

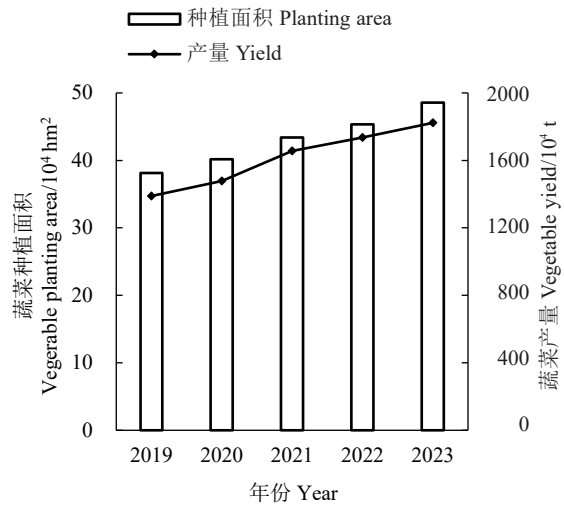


图 1 2019—2023 年甘肃省蔬菜种植面积及产量变化趋势

Fig. 1 Trend of vegetable planting area and yield in Gansu province from 2019 to 2023

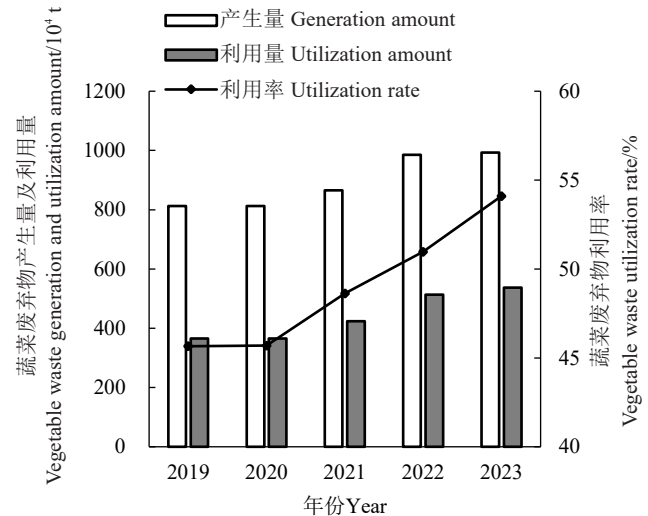


图 2 2019—2023 年甘肃省蔬菜废弃物产生量、利用量及利用率变化趋势

Fig. 2 Trend of vegetable waste generation, utilization amount, and utilization rate in Gansu province from 2019 to 2023

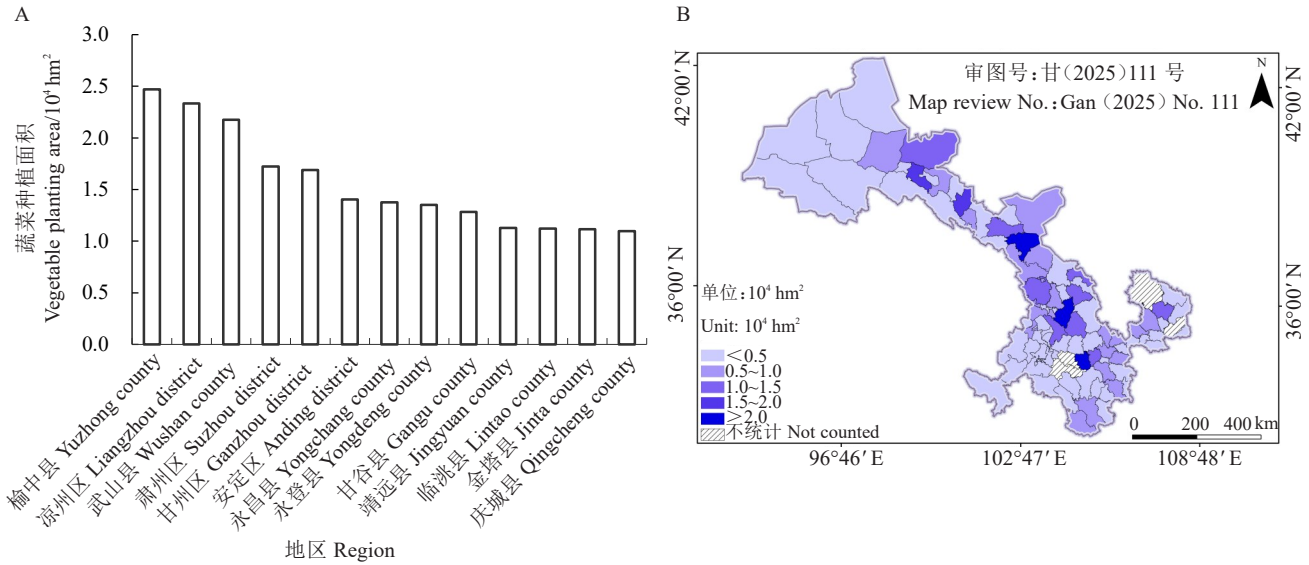
54.10%,增加了 8.44 百分点。

2.3 甘肃省不同县(区)蔬菜废弃物污染风险分析

2.3.1 2023 年甘肃省不同县(区)蔬菜产量及废弃物资源量空间分布特征

甘肃省蔬菜种类繁多,受自

然条件与社会经济因素的综合影响,各县(区)的蔬菜种植规模、产量水平及废弃物资源量存在明显的空间异质性。由图 3 可知,2023 年甘肃省蔬菜种植面积超过 1 万 hm^2 的县(区)共有 13 个,分别为榆中县、凉州区、武山县、肃州区、甘州区、安定区、永昌县、永登县、甘谷县、靖远县、临洮县、金塔县、庆城县。



注: A 为 2023 年甘肃省蔬菜种植面积超过 1 万 hm^2 的县(区);B 为 2023 年甘肃省各县(区)蔬菜种植面积空间分布图。

Note: A represents the counties (districts) with vegetable planting area exceeding $1 \times 10^4 \text{ hm}^2$ in Gansu province in 2023; B represents the spatial distribution map of vegetable sowing area in counties (districts) of Gansu province in 2023.

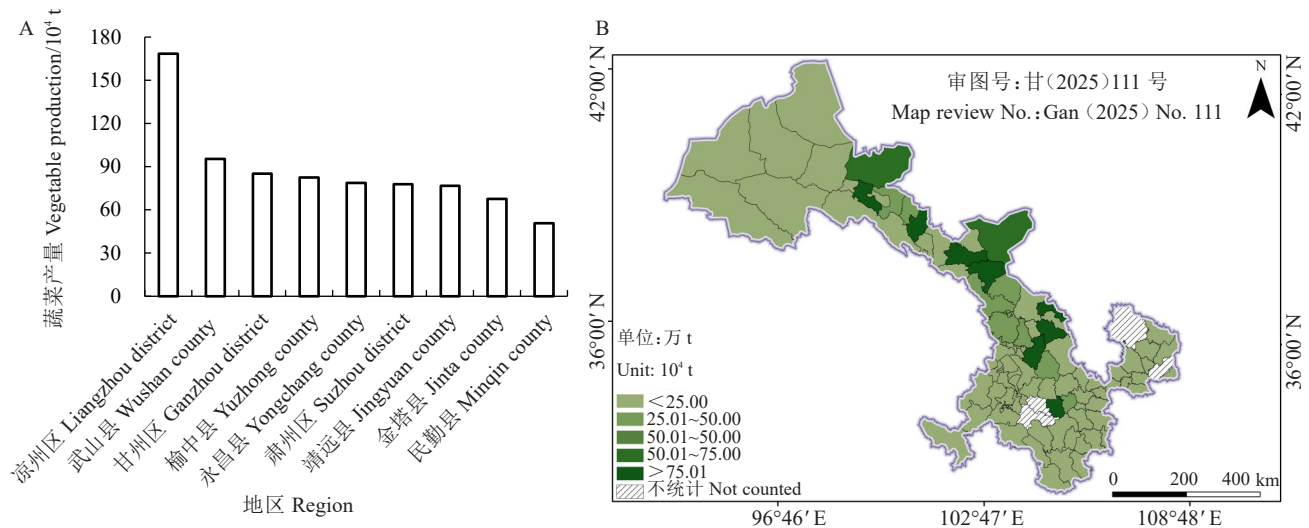
图 3 2023 年甘肃省各县(区)蔬菜种植面积分布

Fig. 3 Spatial distribution of vegetable planting area by county (district) in Gansu province in 2023

永昌县、永登县、甘谷县、靖远县、临洮县、金塔县、庆城县,总种植面积达 20.27 万 hm^2 , 占全省蔬菜种植面积的 45.58%, 其中榆中县、凉州区、武山县蔬菜

种植面积均超过 2 万 hm^2 。

由图 4 可知,2023 年甘肃省蔬菜产量超过 50 万 t 的县(区)共有 9 个,分别为凉州区、武山县、



注: A 为 2023 年甘肃省蔬菜产量超过 50 万 t 的县(区);B 为 2023 年甘肃省蔬菜产量空间分布图。

Note: A represents the counties (districts) with vegetable yield exceeding $50 \times 10^4 \text{ t}$ in Gansu province in 2023; B represents the spatial distribution map of vegetable yield in counties (districts) of Gansu province in 2023.

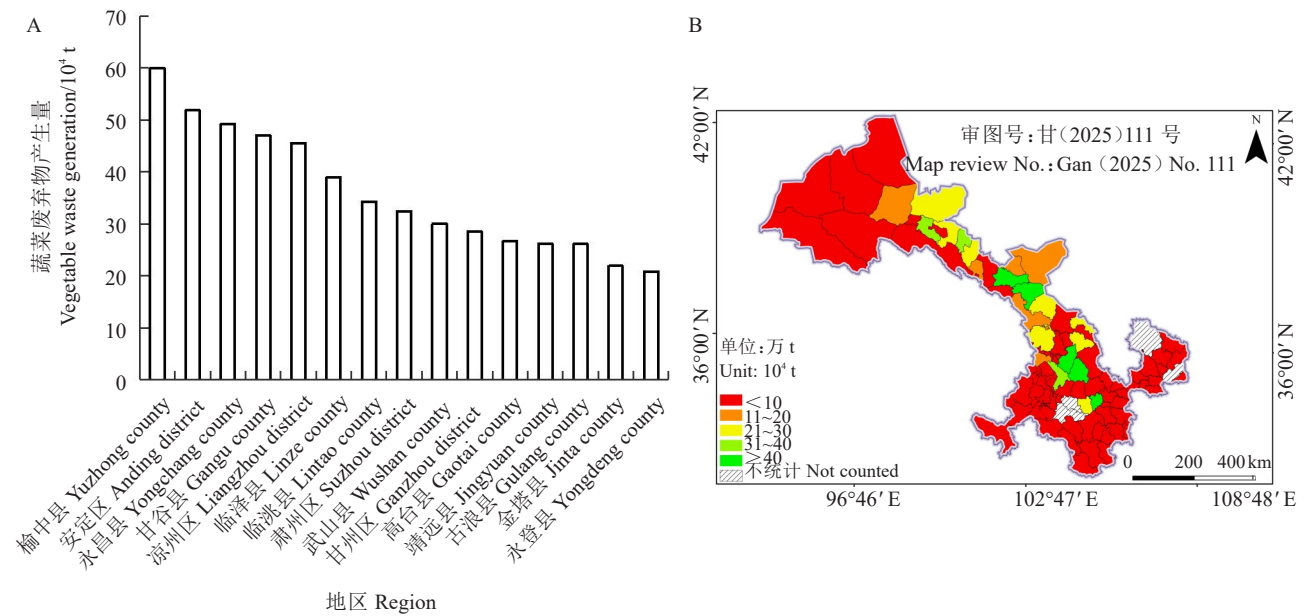
图 4 2023 年甘肃省各县(区)蔬菜产量分布

Fig. 4 Spatial distribution of vegetable yield by county (district) in Gansu province in 2023

甘州区、榆中县、永昌县、肃州区、靖远县、金塔县、民勤县,总蔬菜产量达 783.38 万 t, 占全省蔬菜产量的 46.24%, 其中凉州区、武山县、甘州区、榆中县 4 个县(区)蔬菜产量均超过 80 万 t。

由图 5 可知,2023 年甘肃省蔬菜废弃物产生量超过 20 万 t 的县(区)共有 15 个,分别为榆中县、安

定区、永昌县、甘谷县、凉州区、临泽县、临洮县、肃州区、武山县、甘州区、高台县、靖远县、古浪县、金塔县、永登县,总蔬菜废弃物产生量达 539.46 万 t, 占全省蔬菜废弃物产生量的 67.04%, 其中蔬菜废弃物产生量超过 45 万 t 的有榆中县、安定区、永昌县、甘谷县、凉州区。



注:A 为 2023 年甘肃省蔬菜废弃物产生量超过 20 万 t 的县(区);B 为 2023 年甘肃省各县(区)蔬菜废弃物产生量空间分布图。

Note:A represents the counties (districts) with vegetable waste generation exceeding 20×10⁴ t in Gansu province in 2023; B represents the spatial distribution map of vegetable waste generation in counties (districts) of Gansu province in 2023.

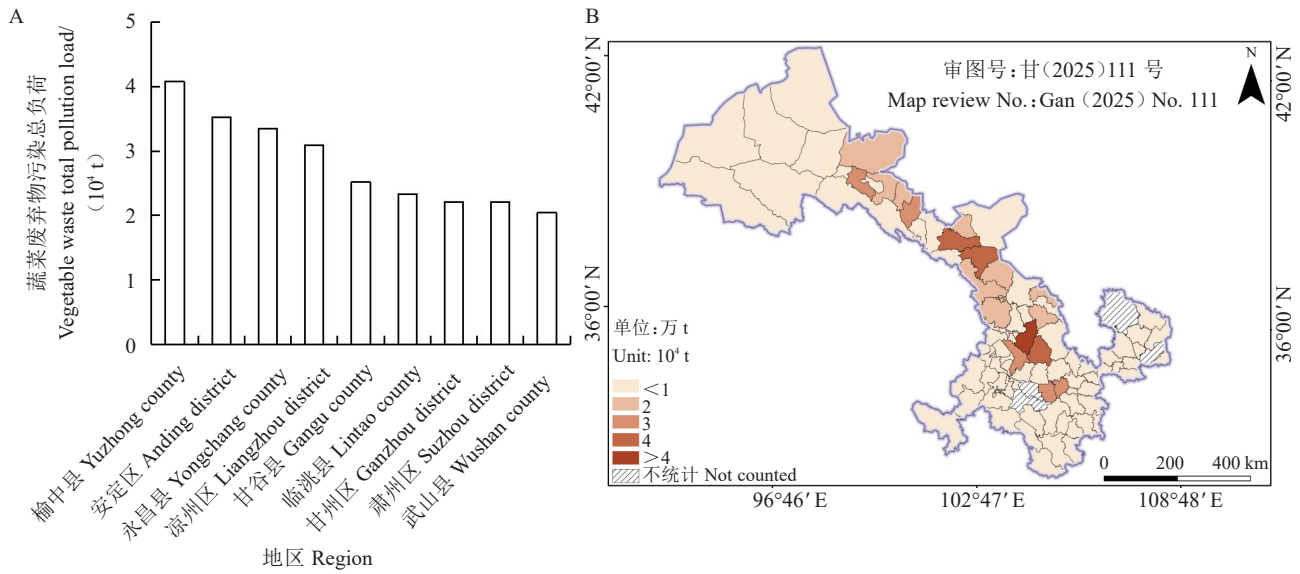
图 5 2023 年甘肃省各县(区)蔬菜废弃物产生量分布
Fig. 5 Spatial distribution of vegetable waste generation by county (district) in Gansu province in 2023

2.3.2 2023 年甘肃省不同县(区)蔬菜废弃物污染总负荷及污染总强度 由图 6 可知,2023 年甘肃省蔬菜废弃物污染总负荷超过 2 万 t 的县区共有 9 个,分别为榆中县、安定区、永昌县、凉州区、甘谷县、临洮县、甘州区、肃州区、武山县,其中榆中县污染总负荷最高,为 4.08 万 t, 占全省(53.42 万 t)污染总负荷的 7.64%, 其次为安定区和永昌县,分别占全省的 6.61% 和 6.27%。

由图 7 可知,2023 年甘肃省各县(区)蔬菜废弃物污染总强度空间差异明显。甘肃省各县(区)蔬菜废弃物平均污染强度为 115.3 kg·hm⁻², 其中,污染总强度超过 300 kg·hm⁻² 的县(区)共有 14 个,分别为榆中县、永昌县、红古区、安定区、甘州区、永靖县、肃州区、金塔县、武山县、天祝县、白银区、凉州区、临洮县、金川区,较平均值高 172.25%~332.17%。而榆中县、永昌县、红古区、安定区 4 个县(区)的污染总强度均超过了 400 kg·hm⁻², 较县

(区)平均值分别增加了 332.17%、306.16%、275.63%、264.96%。

2.3.3 污染风险分析 2023 年甘肃省各主要县(区)蔬菜废弃物中 OM、TN、TP、TK 的污染负荷、污染强度及污染综合指数结果见表 2。污染综合指数从大到小依次为榆中县、永昌县、红古区、安定区、甘州区、永靖县、肃州区、金塔县、武山县、天祝县、白银区、凉州区、临洮县、金川区,其中榆中县、永昌县、红古区、安定区 4 个县(区)污染综合指数较高。由于蔬菜废弃物污染总强度与污染风险存在正相关关系,即污染总强度越高,其通过淋溶、降解及病原传播等途径引发土壤、水体及生态链污染的风险越大。污染综合指数是由蔬菜废弃物污染总强度的数值进行离差标准化分析得出的,故蔬菜废弃物污染风险可由污染综合指数定量表征^[4]。由图 7 可知,甘肃省各县(区)蔬菜废弃物高风险污染区域主要集中在河

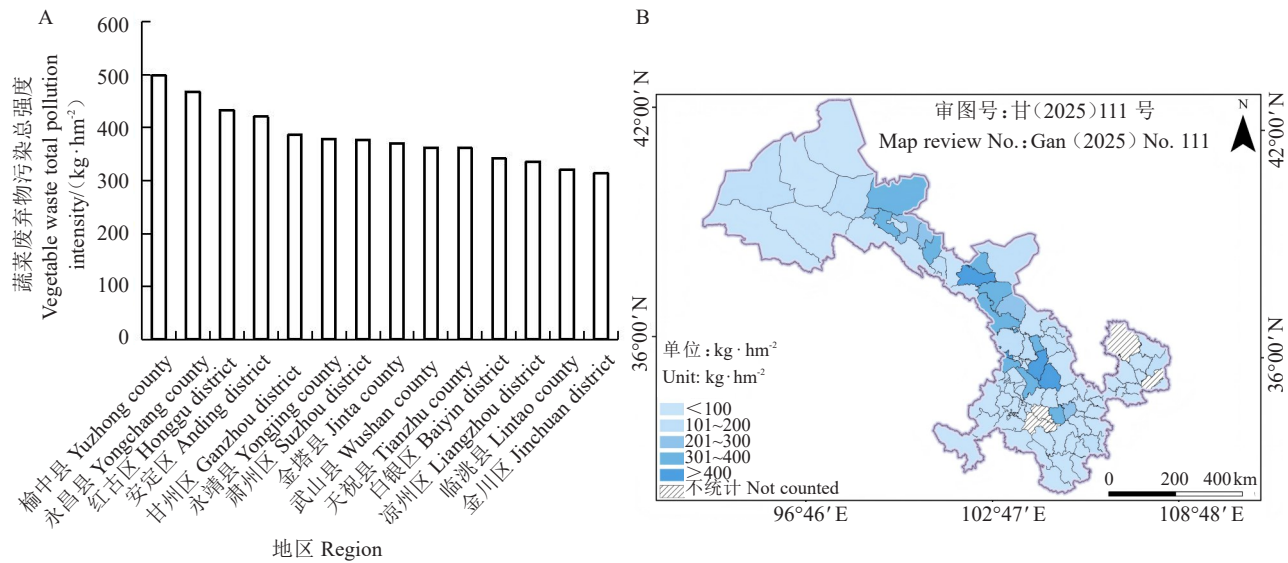


注:A为2023年甘肃省蔬菜废弃物污染总负荷超过2万t的县(区);B为2023年甘肃省各县(区)蔬菜废弃物污染总负荷空间分布图。

Note: A represents the counties (districts) with vegetable waste total pollution load exceeding 2×10⁴ t in Gansu province in 2023; B represents the spatial distribution map of vegetable waste total pollution load in counties (districts) of Gansu province in 2023.

图6 2023年甘肃省各县(区)蔬菜废弃物污染总负荷分布

Fig. 6 Spatial distribution of total vegetable waste total pollution load by county (district) in Gansu province in 2023



注:A为2023年甘肃省蔬菜废弃物污染总强度超过300 kg·hm⁻²的县(区);B为2023年甘肃省各县(区)蔬菜废弃物污染总强度空间分布图。

Note: A represents the counties (districts) with vegetable waste total pollution intensity exceeding 300 kg·hm⁻² in Gansu province in 2023; B represents the spatial distribution map of vegetable waste total pollution intensity in counties (districts) of Gansu province in 2023.

图7 2023年甘肃省各县区蔬菜废弃物污染总强度分布

Fig. 7 Spatial distribution of vegetable waste total pollution intensity by county (district) in Gansu province in 2023

西走廊灌区、中部沿黄灌区和部分渭河流域蔬菜产区,呈现“中部污染程度高、两端污染程度低”的特点。低污染风险区主要为城镇化率较高、农业比重小的县(区);高污染风险区为蔬菜产业规

模大、种植占比高的县(区)。

2.3.4 甘肃省各县(区)蔬菜废弃物资源化利用潜力分析 由统计可知,甘肃省2023年化肥施用折纯总量为76.61万t,而2023年甘肃省蔬菜废弃物

表2 2023年甘肃省蔬菜废弃物高污染风险地区污染情况

Table 2 Spatial distribution of high pollution risk areas from vegetable waste of Gansu province in 2023

县(区) County(District)	污染负荷 Pollution load/(10 ⁴ t)					污染强度 Pollution intensity/(kg·hm ⁻²)					污染综合指数 Pollution composite index
	污染总负荷 Total pollution load	OM	TN	TP	TK	污染总强度 Total pollution intensity	OM	TN	TP	TK	
榆中县 Yuzhong county	4.08	2.32	0.14	0.06	0.14	498.34	283.55	1.70	6.92	17.02	1.000
永昌县 Yongchang county	3.35	1.90	0.11	0.05	0.11	468.28	266.45	1.60	6.50	15.99	0.940
红古区 Honggu district	0.67	0.38	0.02	0.01	0.02	433.08	246.43	1.48	6.01	14.79	0.869
安定区 Anding district	3.53	2.01	0.12	0.05	0.12	420.80	239.43	1.43	5.84	14.37	0.844
甘州区 Ganzhou district	2.21	1.26	0.08	0.03	0.08	386.30	219.81	1.32	5.36	13.19	0.775
永靖县 Yongjing county	0.92	0.52	0.03	0.01	0.03	378.28	215.24	1.29	5.25	12.92	0.759
肃州区 Suzhou district	2.21	1.25	0.08	0.03	0.08	376.99	214.51	1.28	5.23	12.87	0.756
金塔县 Jinta county	1.49	0.85	0.05	0.02	0.05	370.38	210.75	1.26	5.14	12.65	0.743
武山县 Wushan county	2.04	1.16	0.07	0.03	0.07	362.60	206.32	1.24	5.03	12.38	0.728
天祝县 Tianzhu county	1.18	0.67	0.04	0.02	0.04	361.60	205.75	1.23	5.02	12.35	0.726
白银区 Baiyin district	0.35	0.20	0.01	0.00	0.01	341.77	194.46	1.16	4.74	11.67	0.686
凉州区 Liangzhou district	3.09	1.76	0.11	0.04	0.11	336.21	191.31	1.15	4.67	11.48	0.675
临洮县 Lintao county	2.33	1.33	0.08	0.03	0.08	320.93	182.61	1.09	4.45	10.96	0.644
金川区 Jinchuan district	1.15	0.66	0.04	0.02	0.04	313.91	178.61	1.07	4.36	10.72	0.630

肥料化利用潜力可达到4.39万t,占2023年化肥施用折纯总量的5.73%。甘肃省蔬菜废弃物化肥折纯量超过1000t的县(区)共有15个(表3),蔬菜废弃物肥料化利用潜力较大的县(区)有榆中县、安定区、永昌县、凉州区、甘谷县、临洮县、甘州区、肃州

区、武山县、临泽县(表3,图8)。结合各县(区)化肥施用折纯量可知,甘谷县的蔬菜废弃物化肥替代率最高,可达27.79%,永昌人次之,为23.72%,榆中县第三,为21.47%。若进行蔬菜废弃物肥料化利用,可有效减少县(区)内化肥施用量。

表3 2023年甘肃省高污染风险地区蔬菜废弃物肥料化利用潜力及化肥替代率

Table 3 Fertilization utilization potential of vegetable waste and its chemical fertilizer substitution rate in high pollution risk areas of Gansu province in 2023

序号 No.	县(区) County(District)	蔬菜废弃物化肥折纯量 Fertilizer pure nutrient equivalent of vegetable waste/t	实际化肥施用折纯量 Actual pure application of chemical fertilizer/t	替代率 Substitution rate/%
1	甘谷县 Gangu county	2 067.76	7 440.30	27.79
2	永昌县 Yongchang county	2 748.41	11 586.11	23.72
3	榆中县 Yuzhong county	3 349.68	15 599.45	21.47
4	安定区 Anding district	2 894.12	17 565.94	16.48
5	高台县 Gaotai county	1 490.61	9 529.82	15.64
6	临泽县 Linze county	1 615.66	11 965.45	13.50
7	永登县 Yongdeng county	1 164.01	9 110.26	12.78
8	武山县 Wushan county	1 674.84	13 995.29	11.97
9	金塔县 Jinta county	1 222.93	10 373.40	11.79
10	临洮县 Lintao county	1 913.11	18 097.07	10.57
11	靖远县 Jingyuan county	1 460.18	15 302.87	9.54
12	肃州区 Suzhou district	1 810.50	20 247.04	8.94
13	古浪县 Gulang county	1 457.11	16 627.50	8.76
14	凉州区 Liangzhou district	2 540.17	33 824.53	7.51
15	甘州区 Ganzhou district	1 814.41	27 009.00	6.72

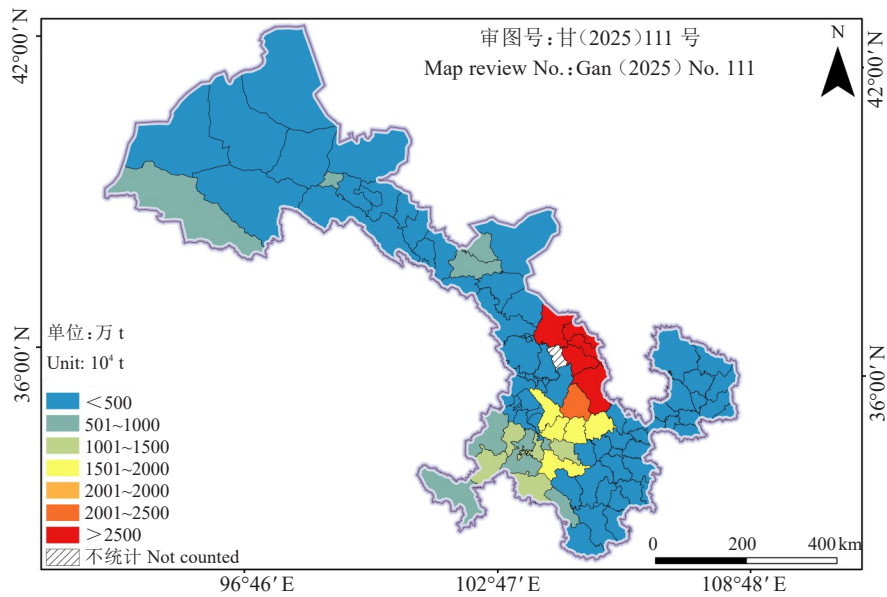


图 8 2023 年甘肃省各县(区)蔬菜废弃物化肥折纯量空间分布图

Fig. 8 Spatial distribution map of fertilizer pure nutrient equivalent from vegetable waste in counties (districts) of Gansu province in 2023

3 讨论与结论

准确评估农业面源污染强度,对推进农业可持续发展与加快农业农村现代化进程具有重要的实践价值。在全国范围内,中国农业面源污染强度虽存在年际波动,但整体呈下降趋势^[20]。我国尤其是西北地区以粗放型农业为特征的经济结构,使得各类农业废弃物成为农村地表水环境的主要污染源^[21]。相较于作物秸秆,蔬菜废弃物因高含水率与易腐性,若处置不当,其所含污染物可随雨水径流及淋溶作用进入水体,对地表水与地下水构成双重环境威胁^[22],故对于甘肃省而言,蔬菜废弃物的资源化利用是美丽乡村建设的重要手段^[23]。

当前,我国对蔬菜废弃物处理利用有原位还田^[24]、好氧堆肥^[25]、饲料利用^[26]、厌氧发酵^[27]等多种处理技术并应用于生产实践,但在技术优化和长效机制等方面仍然面临一些亟待解决的问题^[1]。由数据统计及分析可知,甘肃省河西走廊灌区和中部沿黄灌区蔬菜废弃物共计 623.4 万 t 左右,占整个甘肃省蔬菜废弃物产生总量的 62.79%,产生量巨大,由此带来的环境污染负荷和风险较高,但其中蕴含的养分也非常丰富,资源化利用潜力较大。若能将其资源化利用,不仅可显著降低环境污染负荷,减少土壤和水体中的污染物积累,改善区域生态环境质量,而且还可通过养分回收和能

源化利用,降低农业生产成本,创造附加经济价值。

甘肃省蔬菜废弃物产生量的分布具有明显的地域差异,与甘肃省蔬菜种植分布格局基本一致,甘肃省河西走廊灌区和中部沿黄灌区蔬菜废弃物资源丰富,肃北地区和甘南地区蔬菜废弃物产生量相对较少,呈中部高、两端低的资源分布特点,其与甘肃省气候差异、地形分布、农业生产效率及土壤条件等因素密切相关^[28]。河西走廊灌区和中部沿黄灌区地势相对平坦,土壤肥力及光热资源适中,适宜各种蔬菜生长;而肃北地区和甘南地区由于气候条件以及生态保护需求,不适合大规模种植蔬菜。

评估农业面源污染强度对促进农业可持续发展、推动农业农村现代化具有重要的现实意义^[20]。本文通过实地调研统计发现,榆中县、安定区、永昌县的蔬菜废弃物污染总负荷和污染总强度较高,污染总负荷均超过 3.3 万 t,污染总强度均超过 420.0 kg·hm⁻²,原因是这些县(区)为甘肃省高原夏菜主产区,蔬菜种植面积占比较高;凉州区和永登县污染总负荷较高,但污染强度相对较低,是因为这些地区处于河西走廊灌区和中部沿黄灌区,具备适宜的气候条件和完善的农业生产基础,蔬菜产量较高,而且行政区域广阔、耕地面积较大,故蔬菜废弃物的污染强度相对较低;而

靖远县和天祝县蔬菜废弃物污染总负荷较低,但污染总强度相对较高,可能与该地区蔬菜种植面积及种植模式有关。

近年来,随着国家出台了一系列政策文件,推动化肥减量增效和农业废弃物的资源化利用,农业废弃物作为一种潜在有机肥替代部分化肥是现代绿色农业发展的必然趋势^[29-30]。蔬菜废弃物原位还田或厌氧发酵后产生的沼液均可通过协同提升土壤有机质与速效养分含量,正向调控土壤理化性质,是一种具有环境可持续性的土壤管理实践^[31-32]。此外,蔬菜废弃物经好氧堆肥处理作为一种有机肥还田后,同样能极大提高土壤有机质和速效养分含量,改良土壤结构^[33]。数据统计结果显示,甘肃省蔬菜废弃物肥料化利用潜力可达4.39万t,可替代甘肃省化肥施用折纯总量的5.73%。

2023年甘肃省蔬菜废弃物产生量达992.9万t,具有广阔的开发和应用前景,但其空间分布广,不同县(区)蔬菜废弃物产生量差异很大。对甘肃省各县区蔬菜废弃物污染及资源化利用潜力进行分析,榆中县、安定区、永昌县、凉州区、甘谷县、临洮县、甘州区、肃州区、武山县、临泽县蔬菜废弃物资源化利用潜力位于全省前10位,故应根据不同地区自然条件和经济发展水平,推广适用于该地区的蔬菜废弃物综合利用技术,最大程度地实现蔬菜废弃物的减量化、无害化和资源化。

本研究综合评估了2023年甘肃省蔬菜废弃物的环境风险与资源化利用潜力,结果表明全省蔬菜废弃物污染总负荷达53.42万t,县域平均污染强度为115.3 kg·hm⁻²,且蔬菜废弃物高风险污染区域呈“中部高、两端低”的地域分布特征,即榆中县、永昌县、红古区、安定区、甘州区、永靖县、肃州区、金塔县、武山县、天祝县、白银区、凉州区、临洮县、金川区等中部县(区)是蔬菜废弃物污染的高风险区,同时这些县(区)大部分也是蔬菜废弃物资源化利用潜力较大的区域。测算显示,全省通过蔬菜废弃物肥料化利用,可实现4.39万t的化肥折纯量替代潜力,相当于2023年化肥施用折纯总量的5.73%。基于污染高风险与资源化高潜力的空间耦合性,在甘肃省相关县(区)优先推进蔬菜废弃物肥料化利用,是实现“以用促治”及环境经济效益协同提升的科学路径。

参考文献

- [1] 贾玉琴. 甘肃省设施农业和蔬菜产业的发展现状、潜力与对策分析[J]. 中国瓜菜, 2023, 36(9): 144-150.
- [2] 甘肃省统计局. 甘肃统计年鉴 2024[M]. 北京: 中国统计出版社, 2024.
- [3] 罗娟, 赵立欣, 于佳动, 等. 我国蔬菜废弃物利用研究进展[J]. 中国瓜菜, 2024, 37(3): 1-8.
- [4] ALVAREZ R, LIDEN G. Semi-continuous co-digestion of solid slaughterhouse waste, manure, and fruit and vegetable waste[J]. *Renewable Energy*, 2007, 33(4): 726-734.
- [5] DAS A, MONDAL C. Studies on the utilization of fruit and vegetable waste for generation of biogas[J]. *International Journal of Engineering Science*, 2013, 3(9): 24-32.
- [6] 蔡佳敏, 蔡琳琳, 贾思禹, 等. 蔬菜废弃物肥料化研究进展[J]. 中国蔬菜, 2024(10): 19-27.
- [7] 韩薇薇, 高瑞, 常青平. 京津冀地区蔬菜废弃物污染风险及资源化利用潜力分析[J]. 安徽农业科学, 2024, 52(6): 60-63.
- [8] 陈玉鹏, 颀博杰, 高程斐, 等. 甘肃省榆中县种植业废弃物资源量及资源化利用调查[J]. 中国蔬菜, 2023(10): 96-102.
- [9] 周永馨, 王圣伟, 何书朋, 等. 烟台市种植业有机废弃物还田对畜禽粪污土壤消纳量的影响研究[J]. 中国土壤与肥料, 2021(6): 336-345.
- [10] 石新春, 胡梅芳, 王芙兰, 等. 古浪县农业废弃物资源化利用现状及建议[J]. 农产品加工(学刊), 2013(9): 67-69.
- [11] 安志装, 索琳娜, 刘宝存. 我国农业面源污染研究与展望[J]. 植物营养与肥料学报, 2024, 30(7): 1422-1436.
- [12] RISSMAN A R, CARPENTER R S. Progress on nonpoint pollution: Barriers & opportunities[J]. *Daedalus*, 2015, 144(3): 35-47.
- [13] SHEN Z Y, QIU J L, HONG Q, et al. Simulation of spatial and temporal distributions of non-point source pollution load in the Three Gorges Reservoir Region[J]. *Science of the Total Environment*, 2014(493): 138-146.
- [14] 徐子云, 李永强, 李洁, 等. 黄淮海地区蔬菜废弃物污染风险及资源化潜力分析[J]. 农业资源与环境学报, 2020, 37(6): 904-913.
- [15] 徐大兵, 赵书军, 陈云峰, 等. 湖北省蔬菜废弃物资源量估算与分布特征[J]. 中国蔬菜, 2019(4): 66-72.
- [16] 中华人民共和国国家卫生和计划生育委员会. 食品中水分的测定: GB 5009.3—2016[S]. 北京: 中国标准出版社, 2017.
- [17] 中华人民共和国农业农村部. 有机肥料: NY/T 525—2021[S]. 北京: 中国农业出版社, 2021.
- [18] 中华人民共和国农业部. 植物中氮、磷、钾的测定: NY/T 2017—2011[S]. 北京: 中国农业出版社, 2011.
- [19] 张红丽, 李洁艳. 西部地区农业废弃物可利用潜力及环境效益研究[J]. 生态经济, 2022, 38(10): 111-118.
- [20] 田云, 夏锐, 张星琰. 中国农业面源污染强度测算: 时空分异、动态演进与空间集聚[J]. 环境科学, 2025, 46(9): 5608-5618.
- [21] WU Y H, LIU J Z, SHEN R F, et al. Mitigation of nonpoint source pollution in rural areas: From control to synergies of multi ecosystem services[J]. *Science of the Total Environment*,

- 2017(607/608):1376-1380.
- [22] 陈慈,赵姜,龚晶.蔬菜废弃物资源化利用的技术路径与建议[J].北方园艺,2021(6):156-161.
- [23] 田慎重,郭洪海,姚利,等.中国种养业废弃物肥料化利用发展分析[J].农业工程学报,2018,34(增刊1):123-131.
- [24] 刘本生,杨岩,孙钦平,等.京郊露地蔬菜废弃物原位还田的农学效应研究[J].蔬菜,2018(1):16-21.
- [25] 项娟,李冰,吴迪,等.优化蔬菜废弃物和玉米秸秆配比对堆肥腐熟度的影响[J].中国瓜菜,2023,36(2):49-55.
- [26] 马冉冉,袁洁,张文洁,等.堆放时间对西兰(蓝)花尾菜青贮品质的影响[J].草地学报,2021,29(9):2107-2114.
- [27] 冯晶,张玉华,罗娟,等.批式与连续两相发酵的果蔬废弃物厌氧产气性能[J].农业工程学报,2016,32(22):233-238.
- [28] 雷波,陈炜,马英杰.甘肃省蔬菜产业现状及高质量发展对策研究[J/OL].北方园艺,1-13[2024-07-04].<https://link.cnki.net/urlid/23.1247.S.20240703.1701.002>.
- [29] 佚名.全国农业可持续发展规划(2015—2030年)[J].农村实用技术,2016(4):5-15.
- [30] 宋大利,侯胜鹏,王秀斌,等.中国秸秆养分资源数量及替代化肥潜力[J].植物营养与肥料学报,2018,24(1):1-21.
- [31] 车江伟,蔡兴栋,徐发明,等.设施番茄废弃物原位厌氧还田对土壤理化特性的影响[J].中国瓜菜,2024,37(8):146-151.
- [32] 王晶,汪建旭,卢秀霞,等.施用不同浓度尾菜沼液对芹菜品质和产量及土壤基本性状的影响[J].西北农业学报,2025,34(5):924-931.
- [33] 孔涛,李勃,柯杨,等.蔬菜废弃物堆肥对设施蔬菜产量和土壤生物特性的影响[J].中国土壤与肥料,2017(5):157-160.