



农业资源与环境学报

中文核心期刊
中国科技核心期刊

JOURNAL OF AGRICULTURAL RESOURCES AND ENVIRONMENT

欢迎投稿 <http://www.aed.org.cn>

黄淮海地区蔬菜废弃物污染风险及资源化潜力分析

徐子云, 李永强, 李洁, 王哲, 贾森

引用本文:

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.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13254/j.jare.2019.0638>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

山西省种养废弃物构成及资源化利用潜力研究

杜艳玲, 周怀平, 程曼, 解文艳, 杨振兴, 郭晋, 吕倩倩, 王志伟

农业资源与环境学报. 2019, 36(3): 329–336 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2018.0161>

我国蔬菜废弃物资源化利用技术分析及展望

刘佳豪, 姚昕, 翟胜, 孙树臣, 杨伟鹏, 魏蓉, 陈锦秀, 丁新惠, 田晓飞

农业资源与环境学报. 2020, 37(5): 636–644 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2019.0267>

不同蔬菜种类的产废比例及性状分析

韩雪, 常瑞雪, 杜鹏祥, 李季, 李彦明

农业资源与环境学报. 2015(4): 377–382 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2014.0345>

城乡有机废弃物资源化利用现状及展望

李龙涛, 李万明, 孙继民, 褚飞, 饶中秀, 黄凤球

农业资源与环境学报. 2019, 36(3): 264–271 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2018.0150>

巢湖流域厌氧-土壤净化床工艺处理农村生活污水生态补偿标准测算

丁健, 吴晓斐, 黄治平, 郑宏艳, 米长虹, 郑宏杰

农业资源与环境学报. 2019, 36(5): 584–591 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2018.0205>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

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.
XU Zi-yun, LI Yong-qiang, LI Jie, et al. Pollution risk and resource potential of vegetable waste in the Huang-Huai-Hai region, China[J].
Journal of Agricultural Resources and Environment, 2020, 37(6): 904–913.



开放科学 OSID

黄淮海地区蔬菜废弃物污染风险及资源化潜力分析

徐子云¹, 李永强^{1*}, 李洁^{2*}, 王哲¹, 贾森¹

(1. 土肥资源高效利用国家工程实验室/山东农业大学资源与环境学院, 山东 泰安 271018; 2. 农业农村部环境保护科研监测所, 天津 300191)

摘要:对蔬菜废弃物进行资源化利用和养分回收是实现可持续和生态友好型农业的必要措施。为了确定黄淮海地区蔬菜废弃物的污染风险及资源利用潜力,通过文献整理和数据分析,以地级市为单位估算该地区蔬菜废弃物产量及总氮(TN)、总磷(TP)、总钾(TK)养分污染负荷,利用ArcGIS表征TN、TP、TK污染强度及污染风险综合指数的空间分布情况,确定该区蔬菜废弃物面源污染治理重点区域,并结合化肥需求情况比较蔬菜废弃物资源化利用潜力。结果表明,2017年黄淮海地区蔬菜废弃物总量为1 618.08万t,其中TN、TP、TK污染负荷分别为41.80万、11.18万、53.79万t;各地市蔬菜废弃物污染强度平均为6.45 t·hm⁻²·a⁻¹, TN、TP、TK污染强度分别为15.15、4.05、19.49 kg·hm⁻²·a⁻¹。黄淮海地级市中,蔬菜废弃物污染负荷超过58万t·a⁻¹的地区集中在中部地区,包括徐州、潍坊、周口、南阳、商丘、唐山6市,污染负荷占黄淮海总负荷的26.44%,这些地区TN、TP、TK污染负荷超过1.60万、0.40万、1.90万t·a⁻¹。蔬菜废弃物污染强度超过10 t·hm⁻²·a⁻¹, TN、TP、TK污染强度超过23.76、6.36、31.58 kg·hm⁻²·a⁻¹的地区包括枣庄、开封、莱芜、唐山、泰安、安阳、济南、潍坊、阜阳、商丘。蔬菜废弃物资源化利用潜力较高地区包括潍坊、青岛、德州、聊城、临沂、泰安、济宁、菏泽、商丘、周口、南阳等市,占黄淮海地区的19.0%。研究结果为区域蔬菜废弃物总量控制、合理布局 and 综合利用提供决策依据。

关键词:黄淮海地区;蔬菜废弃物;产废系数;风险评价;空间分布

中图分类号:X712

文献标志码:A

文章编号:2095-6819(2020)06-0904-10

doi: 10.13254/j.jare.2019.0638

Pollution risk and resource potential of vegetable waste in the Huang-Huai-Hai region, China

XU Zi-yun¹, LI Yong-qiang^{1*}, LI Jie^{2*}, WANG Zhe¹, JIA Sen¹

(1. National Engineering Laboratory for Efficient Utilization of Soil and Fertilizer Resources/College of Resources and Environment, Shandong Agricultural University, Tai'an 271018, China; 2. Agro-Environmental Protection Institute, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Tianjin 300191, China)

Abstract: Resource utilization and nutrient recovery of vegetable waste are necessary measures to achieve sustainable and eco-friendly agriculture. In order to determine the pollution risk and utilization potential of vegetable waste in the Huang-Huai-Hai region, we estimated the nutrient contamination load (total nitrogen (TN), total phosphorus (TP), and total potassium (TK)) of vegetable waste in prefecture-level cities, through literature collation and data analysis. We used ArcGIS to characterize the spatial distribution of the comprehensive index for pollution intensity and pollution risk, of TN, TP, and TK, to identify the key areas of this region where should control nonpoint source pollution of vegetable waste. Furthermore, we examined the potential for utilization of vegetable waste resources by comparing the amount of vegetable waste with the demand for fertilizer. The results showed that in the Huang-Huai-Hai region in 2017, the total amount of vegetable waste was 16.18 million tons, with TN, TP, and TK contents of 0.42, 0.11, and 0.54 million tons, respectively;

收稿日期:2019-12-26 录用日期:2020-03-30

作者简介:徐子云(1995—),女,山东烟台人,硕士研究生,从事土壤养分空间变异研究。E-mail: xzyun95@163.com

*通信作者:李永强 E-mail: lyqlinda@163.com; 李洁 E-mail: lijie@caas.cn

基金项目:国家重点研发计划(2018YFD0800403, 2018YFD0800404);山东省青创团队项目

Project supported: National Key R&D Program of China (2018YFD0800403, 2018YFD0800404); Incubation Program of Youth Innovation in Shandong Province

the average pollution intensity of vegetable waste was $6.45 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$, while the TN, TP, and TK pollution intensities were 15.15, 4.05, and $19.49 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$, respectively. In the prefecture-level cities of Huang-Huai-Hai, the areas where the pollution load of vegetable waste exceeded $580\,000 \text{ t} \cdot \text{a}^{-1}$ were concentrated in the central region, and included Xuzhou, Weifang, Zhoukou, Nanyang, Shangqiu and Tangshan. The pollution load accounted for 26.44% of the total load. The pollution load of TN, TP, and TK in these areas exceeded 16 000, 4000 and $19\,000 \text{ t} \cdot \text{a}^{-1}$. The pollution intensity of vegetable waste exceeded $10 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$, and the cities where the pollution intensity of TN, TP, and TK exceeded 23.76, 6.36, and $31.58 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$, respectively, included Zaozhuang, Kaifeng, Laiwu, Tangshan, Tai'an, Anyang, Jinan, Weifang, Fuyang and Shangqiu. The cities with a higher potential for utilization of vegetable waste include Weifang, Qingdao, Dezhou, Liaocheng, Linyi, Tai'an, Jining, Heze, Shangqiu, Zhoukou, and Nanyang, and account for 19.0% of the Huang-Huai-Hai region. These results can be used to inform decisions on the control, rational distribution, and comprehensive utilization of vegetable waste in the Huang-Huai-Hai region.

Keywords: Huang-Huai-Hai region; vegetable waste; waste production coefficient; risk assessment; spatial distribution

近年来,我国蔬菜种植面积和总产量持续增长,2017年全国蔬菜播种面积达1 998.1万 hm^2 ,比2010年1 620.1万 hm^2 增加了23.3%,其中黄淮海地区的播种面积占全国总播种面积的32.6%^[1]。随着蔬菜产量不断增加和居民对蔬菜品质要求不断提高,蔬菜废弃物数量急剧增加。按照农业部统计数据(2015—2017年蔬菜产量)估算,每年我国蔬菜废弃物总量超过2.5亿t,其中可资源化利用的蔬菜废弃物达2.0亿 $\text{t}^{[2-3]}$ 。大量的有机废弃物被随意堆积,极易腐烂发臭,导致蚊蝇滋生^[4]、病菌传播^[5],产生大量臭气并造成有毒化合物排放^[6-7];蔬菜废弃物(干基)中总氮含量2.02%~5.69%、总磷含量0.29%~3.25%,总钾含量0.49%~5.37%^[8],这些矿质元素经地表径流或淋溶作用极易进入地表水和地下水;蔬菜废弃物带来的系列问题已经成为农村环境整治和农业面源污染控制的难点^[9]。

农业面源污染具有时空的不确定性和随机性,估算和评价农业面源污染难度较大,许多模型都将秸秆源污染作为重要面源污染负荷^[10],而在黄淮海蔬菜主产区,蔬菜秸秆污染负荷的占比更大。蔬菜废弃物带来污染风险的同时,也是重要的有机物料资源,其营养成分丰富,有机质含量高,经过无害化处理和资源化开发利用,可作为有机肥料的重要来源。减轻化肥和秸秆污染源的贡献量,可有效降低农业生产成本^[9]。了解蔬菜废弃物的产生量和空间分布是减少蔬菜主产区农业面源污染、推进秸秆资源化利用的前提。而蔬菜废弃物来源复杂、分布零散、迁移途径多样化,使其难以准确估算。目前,学者一般根据作物产量、草谷比系数及含水率等数据推算秸秆产量,如Diep等^[11]依据此法分别估算了越南和美国加州等地的秸秆数量以研究其生物能源开发潜力;徐大兵等^[12]利用草谷比法计算产废系数,进而对湖北省蔬菜废弃

物产量进行评估并研究其分布特征,得出湖北省蔬菜废弃物污染负荷量为206万t,污染强度为 $1\,666 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,为湖北省蔬菜废弃物资源化利用奠定基础。

黄淮海地区是我国蔬菜主产区之一,拥有177个设施蔬菜基地县及68个出口蔬菜基地县^[13],蔬菜种植集约化程度高,蔬菜废弃物产生量大,区域蔬菜生产过程造成的面源污染风险较高。掌握蔬菜废弃物时空分布特征对于黄淮海蔬菜面源污染预测与评估具有重要意义。不同蔬菜类型产废特征差异较大,各地市普遍缺乏蔬菜废弃物产生量准确数据,无法有效评估蔬菜废弃物的污染风险与资源现状。本研究基于年鉴、文献和田间实测数据,通过不同蔬菜类型产废率、含水率、含氮量、含磷量、含钾量,估算黄淮海地区各地级市蔬菜废弃物产量及养分含量,采用ArcGIS表征氮、磷、钾污染负荷及污染强度空间分布,对污染强度指标进行离差标准化进而判断其生态环境污染风险,并结合各市化肥需求量评估资源化利用潜力,为黄淮海地区蔬菜废弃物资源化利用政策制定和产业发展提供数据支撑。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

黄淮海地区包含由黄河、淮河与海河及其支流冲积而成的黄淮海平原,以及鲁中南丘陵和山东半岛^[14],其行政区划范围包括北京、天津、山东、河北、河南,以及江苏、安徽两省的淮北地区,共辖58个地市(图1)。年降水量400~1 200 mm,年平均气温11~16℃,多数地区无霜期大于180 d,土壤以稳产、高产的棕壤和褐土为主,土层深厚、平坦,蔬菜种植高度集约化。2013—2017年黄淮海地区蔬菜年平均产量超过2.47亿t,占全国总产量的31.4%^[1]。

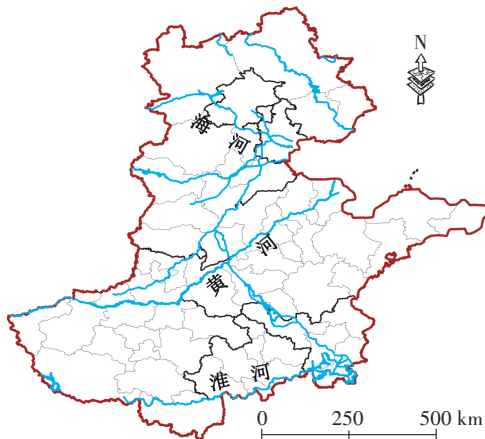


图1 黄淮海地区行政区划图

Figure 1 Administrative division of Huang-Huai-Hai region

1.2 数据来源及计算方法

1.2.1 黄淮海地区蔬菜废弃物产量估算

黄淮海地区各地级市蔬菜产量来源于2008、2013、2018年山东、河南、河北、安徽、江苏、北京、天津统计年鉴；耕地面积及肥料施用量来源于2018年各省(市)统计年鉴。

在以往的研究中,不同种类蔬菜产废系数不同,本研究借鉴农业面源污染计算方式,根据全国各类蔬菜的产量权重及文献获取的产废系数(表1),计算蔬菜平均产废系数、总氮(TN)、总磷(TP)、总钾(TK)含量,计算公式如下:

$$S = \sum_{i=1}^{n=7} P_i \times S_i \quad (1)$$

式中: S 表示蔬菜平均产废系数,%; n 表示中国统计局划分的蔬菜类型; P_i 表示*i*类蔬菜占比,%; S_i 表示*i*类蔬菜产废系数,%。同理计算蔬菜平均含水率和TN、TP、TK含量(表1)。

1.2.2 污染风险评估

草谷比是指农作物秸秆与作物产量的比例,是目前国内比较认可的统计秸秆量的方法^[12],研究利用蔬菜废弃物产废系数与年鉴数据计算黄淮海地区蔬菜废弃物产量及其氮磷钾养分含量,以污染负荷表示。农业面源污染的污染强度反映了某地区的农业集约化程度和单位土地面积的农业活动对水体的影响^[20],研究采用农业面源污染强度方法估算蔬菜废弃物面源污染强度,单位面积耕地土壤的氮磷钾养分负荷反映了蔬菜废弃物对于耕地土壤的污染风险。利用ArcGIS归一化处理蔬菜废弃物TN、TP、TK污染强度,直观反映黄淮海地区58个地市蔬菜废弃物面源污染的空间分布情况,其中,取地级市耕地面积作为归一化字段。

$$L_V = Y \times S \quad (2)$$

$$L_{N/P/K} = Y \times S \times C_{N/P/K} \quad (3)$$

$$S_V = \frac{L_V}{a \times (1 - m)} \times 10\,000 \quad (4)$$

$$S_{N/P/K} = \frac{C_{N/P/K}}{a} \times 1000 \quad (5)$$

式中: L_V 为蔬菜废弃物污染负荷(干基),万t; Y 为蔬菜产量,万t; S 为产废系数,%; $L_{N/P/K}$ 为蔬菜废弃物中TN、TP、TK的污染负荷,t; $C_{N/P/K}$ 为蔬菜废弃物中TN、TP、TK含量,%; S_V 为蔬菜废弃物污染强度,t·hm⁻²; $S_{N/P/K}$ 为TN、TP、TK污染强度,kg·hm⁻²; a 为耕地面积,km²; m 为含水率,%。

蔬菜废弃物污染风险由污染指数定量表示。由于各指标的数值水平相差较大,因此对TN、TP、TK污染强度数值进行离差标准化分析,将标准化值按相同权重相加得到污染综合指数,以及蔬菜废弃物污染风险,将蔬菜废弃物面源污染风险进行排序,以此为依

表1 蔬菜产废系数及TN、TP、TK含量(%)

Table 1 Waste production coefficient of various vegetables and proportion of TN, TP and TK (%)

蔬菜种类 Types of vegetables	代表蔬菜 Representative vegetables	产废系数 Waste production coefficient	含水率 Moisture content	TN含量 TN content	TP含量 TP content	TK含量 TK content	文献 References
叶菜类	白菜	9.7	93.2	2.70	0.67	4.39	[15]
瓜菜类	黄瓜	2.5	88.7	2.27	0.96	3.23	[16]
块根类	萝卜	4.2	91.2	4.04	0.52	2.86	[15]
茄果类	番茄	2.2	84.4	2.43	3.25	4.52	[17]
葱蒜类	大葱	1.7	91.0	2.21	0.37	3.33	[18]
菜用豆类	菜豆	7.6	89.5	2.46	1.15	3.06	[18]
水生菜类	莲藕	2.1	90.5	2.46	1.15	3.06	[19]

注:产废系数和TN、TP、TK含量均以干基计。

Notes: Waste production coefficient, TN, TP and TK content are calculated by dry base.

据确定重点控制区域。离差标准化函数为:

$$Q_i = \frac{X_i - X_{\min}}{X_{\max} - X_{\min}} \tag{6}$$

$$I = \frac{1}{3} \times (Q_N + Q_P + Q_K) \tag{7}$$

式中: Q_i 为评价因子的第*i*级的标准化值; X_i 为评价因子第*i*级的值; $X_{\min}$ 为评价因子最小值; $X_{\max}$ 为评价因子的最大值; I 为综合污染指数; Q_N 、 Q_P 、 Q_K 分别表示TN、TP、TK标准化值。

1.2.3 资源化利用潜力

目前最适宜解决我国蔬菜废弃物资源浪费与污染问题的途径为肥料化利用^[2],在蔬菜废弃物肥料化利用过程中,蔬菜废弃物产量与化学肥料养分需求量共同决定蔬菜废弃物利用潜力。因此,本研究以蔬菜废弃物产量为基础,以化肥需求量为动力^[21],分析黄淮海地区蔬菜废弃物资源化利用潜力。基于2017年黄淮海地区各市统计年鉴数据,对地级市进行分类计算每个变量的黄淮海地区百分位数(表2),利用Arc-GIS制作二维地图表征各地市资源化利用潜力,并对高潜力地区进行分析。

2 结果与分析

2.1 蔬菜废弃物面源污染负荷时间特征

2007、2012、2017年黄淮海地区蔬菜废弃物、TN、TP、TK污染负荷随时间变化结果见图2。2017年黄淮海地区蔬菜废弃物污染负荷为1 618.08万t,较2007年下降8.94%,较2012年下降7.08%,可能是因为随着城乡一体化快速发展,农村居民人口呈现下降趋势,导致蔬菜产量下降,蔬菜废弃物污染负荷也随之下降。2017年,蔬菜废弃物中的TN污染负荷总量为41.80万t,TP负荷总量为11.18万t,TK负荷总量为53.79万t,相当于当年该区化肥施用折氮量、折磷量、折钾量的7.19%、5.10%、25.61%。

将黄淮海地区蔬菜废弃物污染负荷由大到小排列,位于前十的城市为徐州市、潍坊市、周口市、南阳市、商丘市、唐山市、菏泽市、聊城市、开封市及临沂市,统计2007、2012、2017年蔬菜废弃物污染负荷及

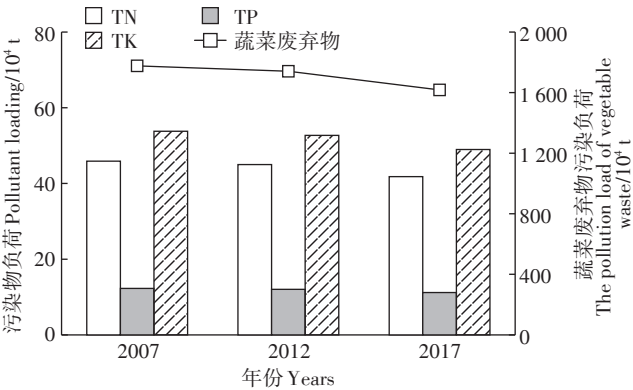


图2 蔬菜废弃物污染负荷时间特征
Figure 2 Temporal characteristic of vegetable waste pollution load

污染强度,结果如图3所示。其中,唐山市2017年蔬菜废弃物污染负荷为59.08万t,较2012年的72.67万t下降18.70%,较2007年的88.12万t下降32.96%。除2017年徐州市、南阳市、聊城市蔬菜废弃物污染负荷分别为88.38万、69.34万、50.08万t,与2007、2012年相差不大外,其他市污染负荷均有不同程度增加或降低。

2.2 污染负荷及污染强度空间特征

从表3可知,黄淮海地区各地级市蔬菜废弃物平均污染负荷为27.90万t·a⁻¹、标准差为20.05万t·a⁻¹,TN、TP、TK平均污染负荷分别为7 207.49、1 927.98、9 274.82 t·a⁻¹,标准差分别为5 181.26、1 385.97、6 667.40 t·a⁻¹。该区各地级市蔬菜废弃物污染强度平均为6.45 t·hm⁻²·a⁻¹、标准差为3.18 t·hm⁻²·a⁻¹,TN、TP、TK污染强度分别为15.15、4.05、19.49 kg·hm⁻²·a⁻¹,标准差分别为7.48、2.00、9.62 kg·hm⁻²·a⁻¹。污染负荷及污染强度空间差异较大。

黄淮海地区58个地市的蔬菜废弃物、TN、TP、TK污染负荷空间分布如图4a~图4d所示。黄淮海地区地级市蔬菜废弃物污染负荷为1.60万~88.39万t·a⁻¹,其中超过40万t·a⁻¹的地市有12个,这些城市行政面积广阔、气候适宜,包括徐州市、潍坊市、南阳市、商丘市、唐山市、周口市、菏泽市、聊城市、临沂市、济宁市、阜阳市、开封市。蔬菜废弃物产生量低于10万t·a⁻¹

表2 2017年各市蔬菜废弃物产量及化肥用量统计

Table 2 Statistics of vegetable waste yield and agricultural fertilizer consumption in Huang-Huai-Hai region in 2017

变量 Variable	最大值 Maximum	10%分位数 10% quantile	25%分位数 25% quantile	50%分位数 50% quantile	75%分位数 75% quantile	最小值 Minimum
蔬菜废弃物产量/10 ⁴ t	88.39	53.02	38.87	21.56	12.23	1.60
化肥使用量/10 ⁴ t	157.78	104.36	62.13	35.06	24.00	2.40

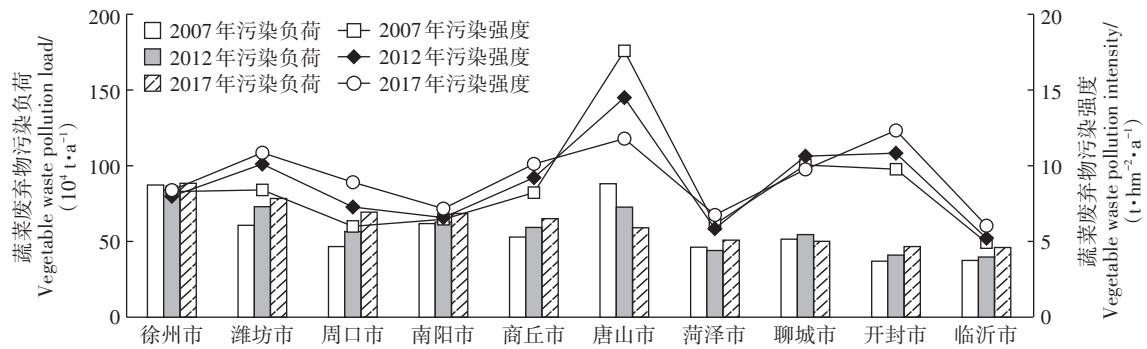


图3 黄淮海地区蔬菜废弃物产量前十城市污染负荷及污染强度时间特征

Figure 3 Distribution of vegetable waste pollution load and pollution intensity in Huang-Huai-Hai region

表3 黄淮海地区污染负荷与污染强度统计

Table 3 Statistical analysis of pollution load and pollution intensity in Huang-Huai-Hai region

指标 Index	城市数 Number	最小值 Minimum	最大值 Maximum	中位数 Median	平均值 Average	标准差 Standard deviation
蔬菜废弃物污染负荷/(10 ⁴ t·a ⁻¹)	58	1.60	88.39	21.55	27.90	20.05
TN 污染负荷/(t·a ⁻¹)	58	412.45	22 835.46	5 568.42	7 207.49	5 181.26
TP 污染负荷/(t·a ⁻¹)	58	110.33	6 108.40	1 489.53	1 927.98	1 385.97
TK 污染负荷/(t·a ⁻¹)	58	530.75	29 385.38	7 165.61	9 274.82	6 667.40
蔬菜废弃物污染强度/(t·hm ⁻² ·a ⁻¹)	58	2.11	14.72	5.36	6.45	3.18
TN 污染强度/(kg·hm ⁻² ·a ⁻¹)	58	4.95	34.57	12.58	15.15	7.48
TP 污染强度/(kg·hm ⁻² ·a ⁻¹)	58	1.32	9.25	3.37	4.05	2.00
TK 污染强度/(kg·hm ⁻² ·a ⁻¹)	58	6.37	44.48	16.19	19.49	9.62

的城市有10个,大多耕地较少,蔬菜种植面积较小,包括北京市、莱芜市、淮南市、三门峡市、日照市、威海市、东营市、鹤壁市、淮北市、济源市。黄淮海地区地级市TN、TP、TK污染负荷分别为412.45~22 835.46 t·a⁻¹、110.33~6 108.40 t·a⁻¹、530.75~29 385.38 t·a⁻¹,其分布规律与蔬菜废弃物污染负荷大致相同,TN污染负荷超过16 000 t·a⁻¹、TP污染负荷超过4 000 t·a⁻¹、TK污染负荷超过19 000 t·a⁻¹的城市有徐州市、潍坊市、周口市、南阳市、商丘市、唐山市,蔬菜废弃物污染负荷占黄淮海地区总负荷的26.44%。

黄淮海地区58个地市蔬菜废弃物、TN、TP、TK污染强度空间分布特征如图5a~图5d所示。蔬菜废弃物污染强度超过10 t·hm⁻²·a⁻¹的有枣庄、开封、莱芜、唐山、泰安、安阳、济南、潍坊、阜阳、商丘10市,其TN、TP、TK污染强度超过23.76、6.36、31.58 kg·hm⁻²·a⁻¹。黄淮海地区城市平均蔬菜废弃物污染强度为6.45 t·hm⁻²·a⁻¹,其中,中部的枣庄市、莱芜市、开封市、泰安市、济南市蔬菜废弃物污染强度较高,分别为14.72、12.33、12.32、11.81、11.52 t·hm⁻²·a⁻¹,比地区平均值分别增加了128.22%、91.16%、91.01%、83.10%、

78.60%。TN、TP、TK污染强度平均分别为15.15、4.05、19.49 kg·hm⁻²·a⁻¹,这些地区耕地面积较小,蔬菜种植比例较高。南部和西部的淮北市、邢台市、鹤壁市、东营市、滨州市污染强度较低,TN、TP、TK污染强度为4.95~6.95、1.32~1.86、7.29~8.44 kg·hm⁻²·a⁻¹。另外,徐州市、周口市、南阳市蔬菜废弃物污染负荷较高,分别为88.39万、69.34万、68.50万 t·a⁻¹,而污染强度较低,分别为8.39、8.91、7.16 t·hm⁻²·a⁻¹。泰安市、枣庄市、莱芜市则相反,蔬菜废弃物污染负荷分别为39.08万、31.62万、8.16万 t·a⁻¹,而污染强度分别为11.81、14.73、12.33 t·hm⁻²·a⁻¹。从以上结果可以看出,蔬菜废弃物、TN、TP、TK污染强度分布较为一致,呈中部和北部较高、西南部较低的特点。

2.3 蔬菜废弃物污染风险空间分析

黄淮海地区蔬菜废弃物污染风险与污染强度空间分布的规律较为一致,综合污染指数超过0.5的城市共有18个,由高到低排序为枣庄市>开封市~莱芜市>唐山市~泰安市>济南市>安阳市>潍坊市>阜阳市>商丘市>秦皇岛市>聊城市>廊坊市>承德市>周口市>青岛市~徐州市~蚌埠市,这些城市的蔬菜废弃物面

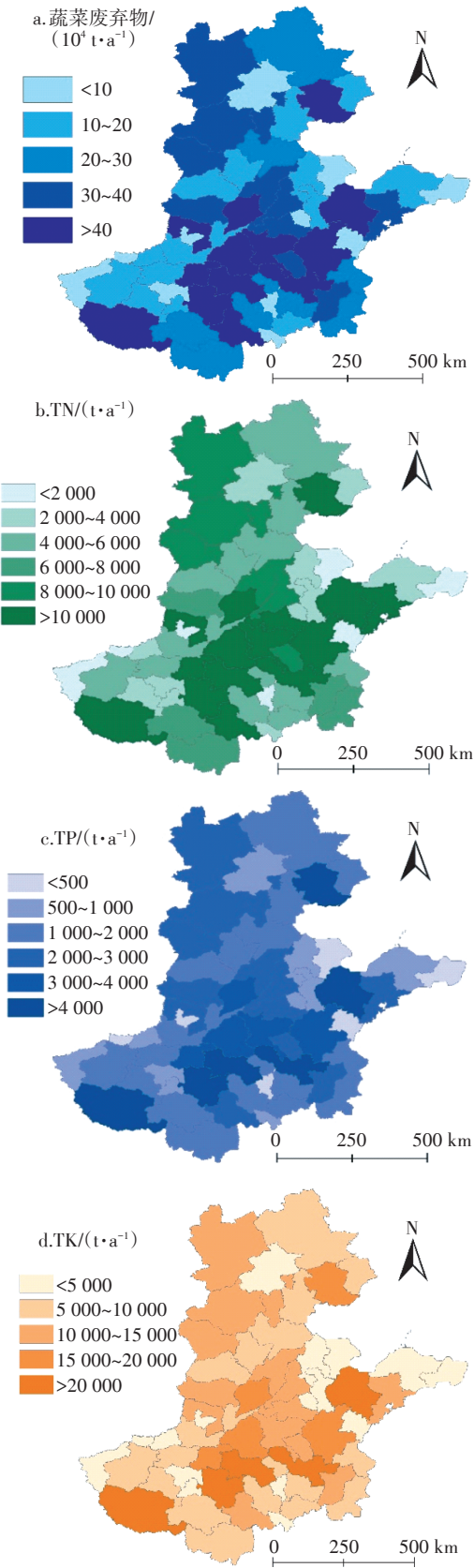


图4 黄淮海地区污染负荷空间分布

Figure 4 Spatial distribution of pollution load in Huang-Huai-Hai region

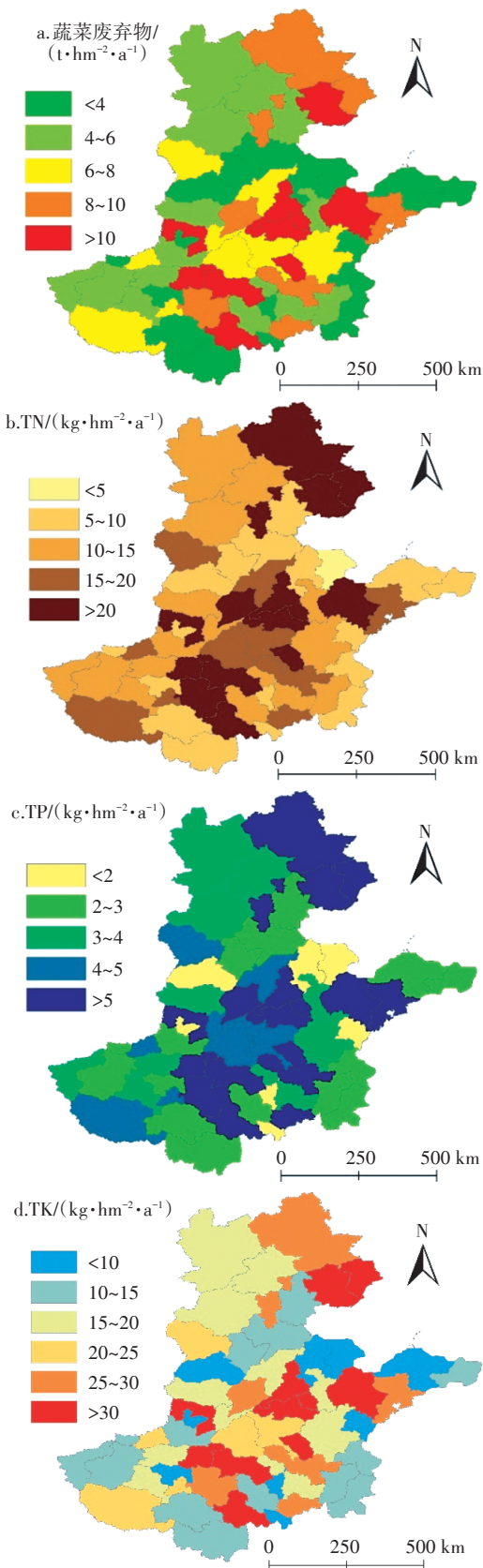


图5 黄淮海地区污染强度空间分布

Figure 4 Spatial distribution of pollution intensity in Huang-Huai-Hai region

源污染风险较高,蔬菜废弃物污染总负荷为784.64万 $\text{t}\cdot\text{a}^{-1}$,占黄淮海地区总负荷的48.49%,蔬菜废弃物平均污染强度为 $10.56\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$,是黄淮海平均强度的1.64倍。污染风险最高城市为枣庄市,蔬菜废弃物综合污染指数为1.00,其蔬菜废弃物污染负荷为31.62万 $\text{t}\cdot\text{a}^{-1}$,TN、TP、TK污染负荷分别为0.82、0.22、1.05万 $\text{t}\cdot\text{a}^{-1}$,蔬菜废弃物污染强度为 $14.73\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$,TN、TP、TK污染强度分别为34.57、9.25、44.48 $\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ (图6、表4)。

2.4 蔬菜废弃物资源化利用潜力

将蔬菜废弃物肥料化利用可代替部分化肥。从图7可知,黄淮海地区蔬菜废弃物产量与化肥需求(施用)折纯量均位于前25%的资源化高利用潜力地区包括潍坊市、青岛市、德州市、聊城市、临沂市、泰安市、济宁市、菏泽市、商丘市、周口市、南阳市,共11个城市,占黄淮海地区的19.00%。这些城市的化肥施用折纯总量为1 137.71万t,占黄淮海地区施用总量的41.8%,蔬菜废弃物总量为588.87万t,占黄淮海地区的36.40%。资源化利用低潜力地区包括北京市、鹤壁市、淮北市、淮南市、济源市、莱芜市、漯河市、三门峡市,这些城市蔬菜废弃物产量与化肥需求(施用)折纯量均位于后25%。将资源化利用潜力较高地区

按蔬菜废弃物产量与化肥施用折纯量10%分位数进行分区,可以看出潍坊市资源化利用潜力最高,蔬菜废弃物产量与化肥施用量均位于前10%;聊城市、菏泽市、临沂市、济宁市化肥施用量位于前10%,蔬菜废弃物产量位于前25%;周口市、商丘市、南阳市蔬菜废弃物产量位于前10%,化肥施用量位于前25%,这些城市资源化利用潜力高于泰安市、青岛市及德州市(图7)。

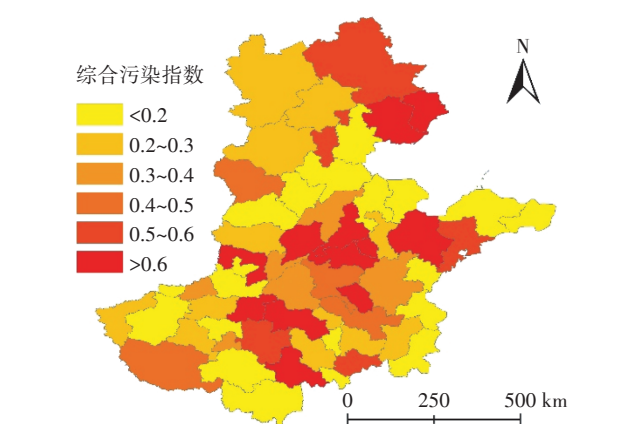


图6 黄淮海地区蔬菜废弃物综合污染指数

Figure 6 Comprehensive pollution index of vegetable waste in Huang-Huai-Hai region

表4 蔬菜废弃物高污染风险地区污染情况

Table 4 Pollution in areas with high risk of vegetable waste contamination

城市 City	污染负荷 Pollution load				污染强度 Pollution intensity				综合污染指数 Comprehensive pollution index
	蔬菜废弃物/ ($10^4\text{ t}\cdot\text{a}^{-1}$)	TN/ ($10^4\text{ t}\cdot\text{a}^{-1}$)	TP/ ($10^4\text{ t}\cdot\text{a}^{-1}$)	TK/ ($10^4\text{ t}\cdot\text{a}^{-1}$)	蔬菜废弃物/ ($\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$)	TN/ ($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$)	TP/ ($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$)	TK/ ($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$)	
枣庄市	31.62	0.82	0.22	1.05	14.73	34.57	9.25	44.48	1.00
开封市	46.65	1.21	0.32	1.55	12.33	28.95	7.74	37.26	0.81
莱芜市	8.16	0.21	0.06	0.27	12.33	28.95	7.74	37.25	0.81
唐山市	58.08	1.50	0.40	1.93	11.79	27.68	7.40	35.62	0.77
泰安市	39.08	1.01	0.27	1.30	11.81	27.73	7.42	35.69	0.77
济南市	37.45	0.97	0.26	1.25	11.53	27.06	7.24	34.82	0.75
安阳市	42.47	1.10	0.29	1.41	11.48	26.95	7.21	34.68	0.74
潍坊市	78.41	2.03	0.54	2.61	10.86	25.49	6.82	32.80	0.69
阜阳市	42.15	1.09	0.29	1.40	10.34	24.27	6.49	31.23	0.65
商丘市	65.10	1.68	0.45	2.16	10.12	23.76	6.36	30.58	0.64
秦皇岛市	15.14	0.39	0.10	0.50	9.96	23.37	6.25	30.08	0.62
聊城市	50.09	1.29	0.35	1.67	9.76	22.91	6.13	29.48	0.61
廊坊市	32.00	0.83	0.22	1.06	9.62	22.58	6.04	29.05	0.60
承德市	21.77	0.56	0.15	0.72	9.12	21.40	5.72	27.53	0.56
周口市	69.34	1.79	0.48	2.31	8.91	20.93	5.60	26.93	0.54
青岛市	39.74	1.03	0.27	1.32	8.42	19.77	5.29	25.45	0.50
徐州市	88.39	2.28	0.61	2.94	8.39	19.70	5.27	25.35	0.50
蚌埠市	19.02	0.49	0.13	0.63	8.45	19.84	5.31	25.53	0.50

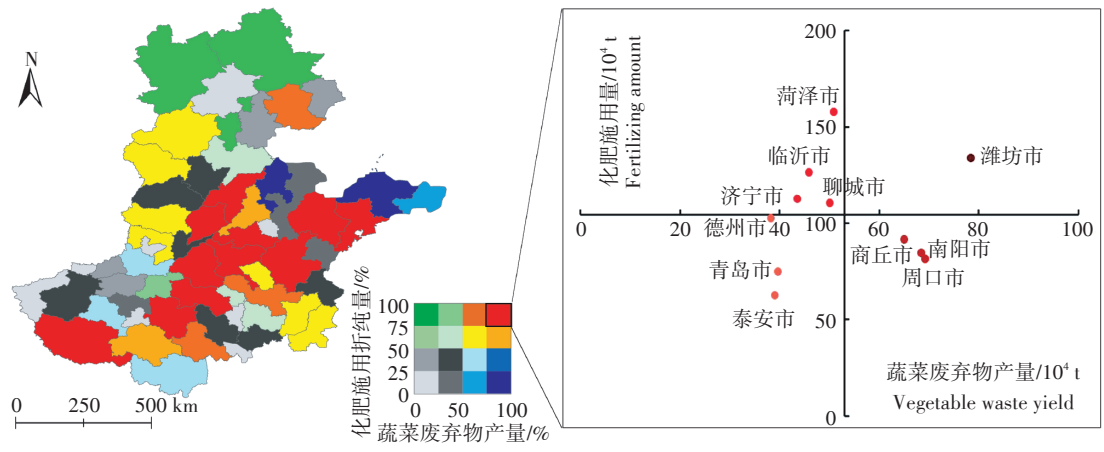


图7 黄淮海地区蔬菜废弃物资源化利用潜力

Figure 7 Resource utilization potential of vegetable waste in Huang-Huai-Hai region

3 讨论

由于我国经济结构为农业粗放型经济,不同类型农业废弃物已成为农村地表水污染主要来源^[22]。与粮食作物秸秆不同,蔬菜废弃物含水率较高,易腐烂发臭,其随污水经地表径流冲刷、渗漏等途径污染地表水和地下水^[9]。如云南滇池流域的蔬菜废弃物被随意堆积或直接丢弃进入湖泊河流,造成的面源污染远超工业生产造成的点源污染^[17]。受管理模式、收获方式的影响,不同蔬菜产废系数存在较大差异^[2],韩雪等^[19]分别对叶菜类、瓜菜类、根茎类等蔬菜类型产废系数进行了比较;在蔬菜主产区,各类蔬菜种植比例相对稳定,利用各类蔬菜种植比例对产废系数进行加权平均,进而确定蔬菜平均产废系数,可在一定程度克服蔬菜种植零散与时空分布不均等造成的蔬菜废弃物产生量难以估测的困难。据中国环境统计年报^[23]报道,黄淮海流域农业源化学需氧量、氨氮、总氮、总磷占十大水系流域的37.9%、33.5%、44.6%、44.2%,其中海河、淮河、黄河流域总氮排放量分别为76.5万、94.2万、35.0万t,总磷排放量分别为8.8万、11.5万、3.9万t(表5)。黄淮海地区蔬菜废弃物中TN、TP污染负荷分别为41.80万、11.18万t,若蔬菜废弃物中TN、TP全部进入水体,相当于黄淮海流域农业污染物总氮、总磷排放量的20.3%、46.2%。

随着化学肥料价格的不断上涨^[24-25],农业废弃物替代部分化学肥料是现代生态农业发展必然趋势。研究结果显示,黄淮海地区蔬菜废弃物TN、TP、TK含量可以替代90.87万t尿素、25.41万t重过磷酸钙、107.58万t硫酸钾。另外,正常种植的蔬菜产生的废

弃物除发生病虫害的组织外,无其他有毒有害物质^[17],还田后其在土壤中降解,能有效提高土壤有机质含量和肥料利用率,改良土壤结构,抑制土壤病原菌的滋生,在综合改善土壤水、肥、气、热等方面具有重要的生态效益^[26]。如蔬菜堆肥后含有大量纤维素分解菌,其可促进土壤有益微生物的增殖并增加土壤中低分子有机酸含量,能够活化土壤养分,有效提高土壤速效养分含量^[27]。

农田作为有机废弃物的消纳场所^[28],其承载力既取决于土壤的质地、肥力,又受作物收获时籽粒和秸秆吸收量的影响^[29],污染强度为单位面积耕地土壤的氮、磷养分负荷,反映了蔬菜废弃物对耕地土壤的污染风险,值得注意的是,南阳市、周口市、徐州市、菏泽市蔬菜废弃物污染负荷较高,但污染强度相对较低。南阳市被称为“中州粮仓”^[30],周口市是全国粮、棉、油、烟集中产地^[31],徐州是第一批国家农业可持续发展试验示范区^[32],这些地区气候条件适宜,农业生产条件完善,蔬菜产量高,但行政区域辽阔,耕地面积较大,蔬菜废弃物污染强度较低。莱芜市、泰安市、枣庄

表5 黄淮海流域农业污染物排放量(10⁴ t)
Table 5 Agricultural pollutant emissions in the Huang-Huai-Hai river basin(10⁴ t)

流域 Basin	化学需氧量 Chemical oxygen demand	氨氮 Ammonia nitrogen	总氮 Total nitrogen	总磷 Total phosphorus
海河	154.6	7.8	76.5	8.8
淮河	175.5	13.0	94.2	11.5
黄河	75.1	3.5	35.0	3.9
合计	405.2	24.3	205.7	24.2
蔬菜废弃物	—	—	41.80	11.18
潜在贡献率/%	—	—	20.3	46.2

市蔬菜废弃物污染负荷较低,但污染强度相对较高,可能与蔬菜种植面积及种植模式有关。2017年泰安市、枣庄市粮食种植面积分别为36.67万、28.09万 hm^2 ,蔬菜种植面积达10.71万、9.02万 hm^2 ,蔬菜种植比例较高,蔬菜废弃物污染强度较高,但这些地区行政面积相对较小,蔬菜产量较低,蔬菜废弃物污染负荷较低。黄淮海地区蔬菜废弃物总量达1 618.08万t,具有良好的蔬菜秸秆开发和应用前景,但其空间分布广,不同地区蔬菜秸秆产生量差异很大^[33]。对黄淮海地区各地级市蔬菜废弃物污染及资源利用潜力进行分析,潍坊市、青岛市、德州市、聊城市、临沂市等11个城市利用潜力较高。应根据不同地区自然和经济条件,结合农业发展水平,推广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、资源化。

4 结论

(1)2017年黄淮海地区蔬菜废弃物、TN、TP、TK污染负荷分别为1 618.08万、41.80万、11.18万、53.79万t,各市蔬菜废弃物平均污染强度为 $6.45 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$,TN、TP、TK污染强度分别为15.15、4.05、19.49 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 。

(2)黄淮海地区各地级市蔬菜废弃物污染差异较大,不同污染物的污染负荷较为一致,同一污染物污染负荷呈中部和北部高、西南部低的特点。蔬菜废弃物污染负荷较高的地区包括徐州市、潍坊市、周口市、南阳市、商丘市和唐山市;蔬菜废弃物污染强度较高的地区包括枣庄市、莱芜市、开封市、泰安市和济南市。其中,南阳市、周口市、徐州市蔬菜废弃物污染负荷较大,超过68.50万t,而污染强度较低,最高仅为 $8.91 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$;莱芜市、泰安市、枣庄市则相反,污染负荷低于39.08万t,而污染强度超过 $11.81 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 。

(3)蔬菜废弃物面源污染重点地区包括枣庄市、开封市、莱芜市、唐山市、泰安市、安阳市、济南市、潍坊市、阜阳市、商丘市、秦皇岛市、聊城市、廊坊市、承德市、周口市、青岛市、徐州市、蚌埠市,共18个地市。蔬菜废弃物资源化高利用潜力地区包括潍坊市、青岛市、德州市、聊城市、临沂市、泰安市、济宁市、菏泽市、商丘市、周口市、南阳市,共11个地市。

参考文献:

- [1] 国家统计局. 中国统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2018.
National Bureau of Statistics. China statistical yearbook[M]. Beijing:

- China Statistics Press, 2018.
[2] 杜鹏祥, 韩雪, 高杰云, 等. 我国蔬菜废弃物资源化高效利用潜力分析[J]. 中国蔬菜, 2015(7): 15-20.
DU Peng-xiang, HAN Xue, GAO Jie-yun, et al. Potential analysis on high efficient utilization of waste vegetable resources in China[J]. *China Vegetables*, 2015(7): 15-20.
[3] 宋玉晶, 柴立平. 我国蔬菜废弃物综合利用模式分析——以寿光为例[J]. 中国蔬菜, 2018(1): 12-17.
SONG Yu-jing, CHAI Li-ping. Analysis on the comprehensive utilization model of vegetable waste in China: Taking Shouguang as an example[J]. *China Vegetables*, 2018(1): 12-17.
[4] Alvarez R, Lidén G. Semi-continuous co-digestion of solid slaughterhouse waste, manure, and fruit and vegetable waste[J]. *Renewable Energy*, 2008, 33(4): 726-734.
[5] Mahmoud M, Elreedy A, Pascal P, et al. Hythane(H_2 and CH_4) production from unsaturated polyester resin wastewater contaminated by 1, 4-dioxane and heavy metals via up-flow anaerobic self-separation gases reactor[J]. *Energy Conversion and Management*, 2017, 152: 342-353.
[6] 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.
[7] 秦渊渊, 郭文忠, 李静, 等. 蔬菜废弃物资源化利用研究进展[J]. 中国蔬菜, 2018(10): 17-24.
QIN Yuan-yuan, GUO Wen-zhong, LI Jing, et al. Research progress in resource utilization of vegetable waste[J]. *China Vegetables*, 2018(10): 17-24.
[8] 王亚利, 杨光, 熊才耘, 等. 蔬菜废弃物蚯蚓堆肥对鸡毛菜生长的影响[J]. 农业环境科学学报, 2017, 36(10): 2129-2135.
WANG Ya-li, YANG Guang, XIONG Cai-yun, et al. Effect of vegetable waste vermicompost on the growth of *Brassica chinensis*[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2017, 36(10): 2129-2135.
[9] Mukhter A, Shakeel A, Fayyaz H, et al. Innovative processes and technologies for nutrient recovery from wastes: A comprehensive review[J]. *Sustainability*, 2019, 11: 4938.
[10] 谢经朝, 赵秀兰, 何丙辉, 等. 汉丰湖流域农业面源污染氮磷排放特征分析[J]. 环境科学, 2019, 40(4): 1760-1769.
XIE Jing-zhao, ZHAO Xiu-lan, HE Bing-hui, et al. Analysis of the characteristics of nitrogen and phosphorus emissions from agricultural non-point sources on Hanfeng Lake basin[J]. *Environmental Science*, 2019, 40(4): 1760-1769.
[11] Diep N, Fujimoto S, Minowa T, et al. Estimation of the potential of rice straw for ethanol production and the optimum facility size for different regions in Vietnam[J]. *Applied Energy*, 2012, 93(5): 205-211.
[12] 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.
XU Da-bing, ZHAO Shu-jun, CHEN Yun-feng, et al. Estimation and distribution characteristics of vegetable waste resources in Hubei Province[J]. *China Vegetables*, 2019(4): 66-72.
[13] 农业部. 全国蔬菜重点区域发展规划(2009—2015年)[R]. 北京: 农业部, 2011.
Ministry of Agriculture of PRC. National vegetable key regional devel-

- opment plan (2009—2015) [R]. Beijing: Ministry of Agriculture of PRC, 2011.
- [14] 李卓, 刘淑亮, 孙然好, 等. 黄淮海地区耕地复种指数的时空格局演变[J]. 生态学报, 2018, 38(12): 4454-4460.
- LI Zhuo, LIU Shu-liang, SUN Ran-hao, et al. Identifying the temporal-spatial pattern evolution of the multiple cropping index in the Huang-Huai-Hai region[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, 38(12): 4454-4460.
- [15] 席旭东, 晋小军, 张俊科. 蔬菜废弃物快速堆肥方法研究[J]. 中国土壤与肥料, 2010(3): 62-66.
- XI Xu-dong, JIN Xiao-jun, ZHANG Jun-ke. The study of rapid composting method by vegetable wastes[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2010(3): 62-66.
- [16] 莫舒颖, 张志刚, 尚庆茂, 等. 蔬菜残株的化学组成分析[J]. 中国蔬菜, 2008(12): 21-23.
- MO Shu-ying, ZHANG Zhi-gang, SHANG Qing-mao, et al. Analysis on chemical components of vegetable stumps[J]. *China Vegetables*, 2008(12): 21-23.
- [17] 黄鼎曦, 陆文静, 王洪涛. 农业蔬菜废物处理方法研究进展和探讨[J]. 环境污染治理技术与设备, 2002, 3(11): 38-42.
- HUANG Ding-xi, LU Wen-jing, WANG Hong-tao. Progress on study of agricultural vegetable waste treatment[J]. *Techniques and Equipment for Environmental Pollution Control*, 2002, 3(11): 38-42.
- [18] 袁顺全, 曹婧, 张俊峰, 等. 蔬菜秧与牛粪好氧堆肥试验研究[J]. 中国土壤与肥料, 2010(4): 61-64.
- YUAN Shun-quan, CAO Jing, ZHANG Jun-feng, et al. Experimental study on compost of vegetable waste and cow dung[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2010(4): 61-64.
- [19] 韩雪, 常瑞雪, 杜鹏祥, 等. 不同蔬菜种类的产废比例及性状分析[J]. 农业资源与环境学报, 2015, 32(4): 377-382.
- HAN Xue, CHANG Rui-xue, DU Peng-xiang, et al. Straw coefficient and properties of different vegetable wastes[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2015, 32(4): 377-382.
- [20] 熊昭昭, 王书月, 童雨, 等. 江西省农业面源污染时空特征及污染风险分析[J]. 农业环境科学学报, 2018, 37(12): 2821-2828.
- XIONG Zhao-zhao, WANG Shu-yue, TONG Yu, et al. Analysis on spatio-temporal characteristics of agricultural non-point sources pollution and pollution risk in Jiangxi Province, China[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2018, 37(12): 2821-2828.
- [21] Powers S M, Chowdhury R B, MacDonald G K, et al. Global opportunities to increase agricultural independence through phosphorus recycling[J]. *Earth's Future*, 2019, 7(4): 370-383.
- [22] 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.
- [23] 环境保护部. 中国环境统计年报[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2015.
- Ministry of Environmental Protection of PRC. Annual statistical report on the environment in China[M]. Beijing: China Environmental Sciences Press, 2015.
- [24] 侯萌瑶, 张丽, 王知文, 等. 中国主要农作物化肥用量估算[J]. 农业资源与环境学报, 2017, 34(4): 360-367.
- HOU Meng-yao, ZHANG Li, WANG Zhi-wen, et al. Estimation of fertilizer usage from main crops in China[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2017, 34(4): 360-367.
- [25] Mehta C, Khunjar W, Nguyen V, et al. Technologies to recover nutrients from waste streams: A critical review[J]. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 2015, 45(4): 385-427.
- [26] 赵鹏, 陈阜, 马新明, 等. 麦玉两熟秸秆还田对作物产量和农田氮素平衡的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2010, 28(2): 162-166.
- ZHAO Peng, CHEN Fu, MA Xin-ming, et al. Effects of integrated straw on crop yield and nitrogen balance in winter wheat & summer maize[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2010, 28(2): 162-166.
- [27] 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.
- KONG Tao, LI Bo, KE Yang, et al. Effect of vegetables waste compost on protected vegetable yield and soil microbial property[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2017(5): 157-160.
- [28] 苏瑶, 杨艳华, 贾生强, 等. 秸秆还田下的主要产地环境问题及其绿色防控技术[J]. 农业资源与环境学报, 2019, 36(6): 711-717.
- SU Yao, YANG Yan-hua, JIA Sheng-qiang, et al. Main problems of agricultural production areas after straw returning and the respective green control technologies[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2019, 36(6): 711-717.
- [29] Manyuchi M, Phiri A. Vermicomposting in solid waste management: A review[J]. *International Journal of Scientific Engineering and Technology*, 2013, 2(12): 1234-1242.
- [30] 张志, 刘耀林, 龚健. 耕地转为建设用地价格评估——以河南省南阳市为例[J]. 自然资源学报, 2009, 24(12): 81-89.
- ZHANG Zhi, LIU Yao-lin, GONG Jian. Method and case study on transfer price appraisal from cultivated land to constructive land[J]. *Journal of Natural Resources*, 2009, 24(12): 81-89.
- [31] 贾振宇, 张俊华, 丁圣彦, 等. 基于GIS和地统计学的黄泛区土壤磷空间变异——以周口为例[J]. 应用生态学报, 2016, 27(4): 1211-1220.
- JIA Zhen-yu, ZHANG Jun-hua, DING Sheng-yan, et al. Spatial variation of soil phosphorus in flooded area of the Yellow River based on GIS and geo-statistical methods: A case study in Zhoukou City, Henan, China[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2016, 27(4): 1211-1220.
- [32] 农业部. 第一批国家农业可持续发展试验示范区公示(2017年) [R]. 北京: 农业部, 2017.
- Ministry of Agriculture of PRC. Publication of the first batch of national agricultural sustainable development pilot demonstration zones (2017)[R]. Beijing: Ministry of Agriculture of PRC, 2017.
- [33] 方放, 李想, 石祖梁, 等. 黄淮海地区农作物秸秆资源分布及利用结构分析[J]. 农业工程学报, 2015, 31(2): 228-234.
- FANG Fang, LI Xiang, SHI Zu-liang, et al. Analysis on distribution and use structure of crop straw resources in Huang-Huai-Hai Plain of China[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2015, 31(2): 228-234.