

陈利洪,舒帮荣,李鑫. 华东地区农业废弃物资源量估算及其综合利用评价[J]. 江苏农业科学,2018,46(13):251-255.
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2018.13.058

华东地区农业废弃物资源量估算及其综合利用评价

陈利洪,舒帮荣,李鑫

(江苏师范大学地理测绘与城乡规划学院,江苏徐州 221116)

摘要:采用针对华东地区的相关系数有利于更准确地评价该地区的农业废弃物资源潜力,通过筛选和确定各种系数,估算和比较我国华东地区的秸秆和畜禽粪便的资源潜力和可开发潜力。结果表明,2015 年我国华东地区的秸秆资源总量为 22 074.1 万 t,约占全国秸秆资源总量的 22.4%;秸秆可利用量为 17 595.5 万 t,折合标准煤为 8 703.8 万 t;畜禽粪便的干物质资源量为 6 160.6 万 t,约占全国畜禽粪便干物质总量的 18.6%,折合标准煤为 3 400.4 万 t;畜禽粪便干物质可利用总量为 3 161.8 万 t;2015 年华东地区农业废弃物的沼气可开发潜力为 260.3 亿 m³,其中秸秆为 125.2 亿 m³,畜禽粪便为 135.1 亿 m³;畜禽粪便沼气已开发率较低,开发潜力巨大。华东地区是我国重要的农业发展区域之一,研究其农业废弃物的资源潜力和可开发潜力对该地区废弃物资源高效综合利用有重要的参考意义。

关键词:华东地区;相关系数;农业废弃物;秸秆;畜禽粪便;资源潜力;沼气

中图分类号:X71 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-1302(2018)13-0251-04

推进农业废弃物资源循环利用、发展清洁能源、应对气候变化是我国面临的重大挑战。21 世纪是低碳发展的世纪,农牧业废弃物的减量化、资源化、综合化处理利用是实现低碳农业的基本要求。农牧业废弃物的资源化循环利用和生物能源化已经成为许多国家低碳发展与可再生能源开发的战略重点,并有望成为极具发展潜力的战略性行业^[1]。我国每年都会产生大量的农业废弃物,近年来全国性的农业废弃物资源潜力和开发潜力受到了研究者的广泛关注^[2-5]。目前,普遍认为农业废弃物不仅可以提供清洁能源,还能有效减少温室气体排放。农业废弃物的能源化利用尤其是基于沼气的循环农业利用是其中的重点^[6-8]。

我国大量农业废弃物在空间上呈现区域分布不均衡性与相对集中性的特点^[9]。区域农业废弃物资源潜力和利用是近年研究的热点,如江苏^[10]、上海^[11]、山东^[12]等地区的秸秆资源化利用,江苏省秸秆^[13]和畜禽粪便^[14]的资源量估算,浙江嘉兴地区农业废弃物的循环利用模式^[15],江西绿丰生态农业园有限公司的畜禽粪便养分综合管理^[16]等研究。王晓玉针对我国华东地区的秸秆资源量进行了专题评价^[17],其他专门针对华东地区农业废弃物资源潜力和利用的研究鲜有报道。农业废弃物区域性很强,尤其是动物排泄系数,全国性的农业废弃物评估往往在系数选择上不能照顾到区域差异性。因此,采用适合华东地区的相关系数有利于更准确地评价该地区的资源潜力情况,也对促进该地区循环农业发展有重要的指导意义。

1 试验方法与数据来源

1.1 农牧业废弃物资源量估算

收稿日期:2017-12-21

基金项目:江苏省社会科学基金一般项目(编号:17EYB010)。

作者简介:陈利洪(1979—),男,四川宜宾人,博士,讲师,主要从事农业废弃物资源评估、清洁能源与温室气体减排研究。Tel:(0516) 83500270;E-mail:clh@jsnu.edu.cn。

1.1.1 农作物秸秆资源量估算 农作物秸秆一般通过草谷比系数进行估算^[18]。草谷比系数指植株秸秆与收获粮食或产品之间的比值。石元春认为用草谷比系数估算农作物秸秆资源量相当准确^[3]。

1.1.1.1 理论资源量

$$TRA_{\text{straw}} = \sum_{i=1}^n P_i \times \lambda_i \quad (1)$$

式中: TRA_{straw} 为秸秆资源的理论蕴藏量,单位为 t; P_i 为第 i 种农作物的产量,单位为 t; λ_i 为第 i 种农作物的草谷比系数,我国主要农作物草谷比系数^[3]如表 1 所示。

表 1 我国主要农作物草谷比系数

农作物	草谷比系数
稻谷	0.623
小麦	1.366
玉米	2.000
其他杂粮	1.000
豆类	1.500
薯类	0.500
油料	2.000
棉花	3.000
甘蔗	0.100
蔬菜	0.100

1.1.1.2 可利用量 由于并非所有的秸秆资源都能被有效收集,在排除收集损失后的秸秆资源量才是秸秆资源的可利用量。秸秆资源可获得量如下所示:

$$ARA_{\text{straw}} = \sum_{i=1}^n TRA_i \times \eta_i \quad (2)$$

式中: ARA_{straw} 为秸秆资源的可获得量,即可利用量,单位为 t; TRA_i 为第 i 种农作物的理论资源量,单位为 t; η_i 为第 i 种农作物的收集系数,我国主要农作物秸秆的收集系数^[4,6]和折准标煤系数^[3,19]如表 2 所示。

1.1.1.3 农作物秸秆的用途 农作物秸秆可以用于农村能源、秸秆饲料、秸秆还田、工业原料、食用菌基料等,剩下的部分一般作为能源用途尤其是沼气用途,参考蔡亚庆等的研

表 2 各类农作物秸秆的收集系数和折标准煤系数

农作物	可收集系数	折标准煤系数
稻谷	0.75	0.429
小麦	0.74	0.500
玉米	0.95	0.529
其他杂粮	0.80	0.500
豆类	0.80	0.543
薯类	0.80	0.486
油料	0.88	0.529
棉花	0.90	0.543
甘蔗	0.88	0.440
蔬菜	0.60	0.430

究^[2]对华东地区的农作物秸秆利用进行进一步的分析和评价。

1.1.2 畜禽粪便资源量估算 畜禽粪便是畜禽排泄物的总称,是其他形态生物质(主要是粮食、农作物秸秆、牧草等)的转化形式,包括畜禽排出的粪便、尿及其与垫草的混合物^[18]。

1.1.2.1 理论资源量

$$TRA_{\text{dunn}} = \sum_{i=1}^n N_i \times T_i \times DC_i \quad (3)$$

式中: TRA_{dunn} 为畜禽粪便的理论资源量,单位为 t; N_i 为第*i*类禽畜的年养殖数量,单位为头(只); T_i 为第*i*类禽畜的养殖周期,单位为 d; DC_i 为第*i*类畜禽的排泄系数,华东地区主要禽畜排泄系数^[3,7,20~22]如表 3 所示。

表 3 华东地区主要禽畜排泄系数

禽畜	饲养周期 (d)	日产粪量 (kg/头)	年产粪量 (t/头)	日排尿量 (kg/头)	年排尿量 (t/头)
肉猪	150	1.12	0.168	2.55	0.383
母猪	365	1.58	0.580	5.06	1.850
奶牛	365	31.60	11.630	15.24	5.560
其他牛	365	14.80	5.400	8.91	3.250
马	365	16.20	5.900	5.00	1.830
驴/骡	365	13.70	5.000	4.50	1.640
羊	365	2.60	0.950	—	—
肉禽	60	0.22	0.011	—	—
蛋禽	365	0.15	0.037	—	—

注:肉禽和蛋禽主要分别指肉鸡、蛋鸡;“—”表示尿液量明显偏少,忽略不计。

1.1.2.2 可利用量 可收集的畜禽粪便资源一般来自猪、牛、家禽等。畜禽尿液中的干物质比例与粪便中的有机物质中干物质比例差距较大,因此本研究将分开计算畜禽粪便及尿液中有机物质的干物质质量。畜禽粪便和尿液的可收集系数^[3,21]、折标煤系数^[3,21]、干物质含量^[1,23]、产气因子^[1,23~24]等如表 4 所示。

1.1.2.3 畜禽粪便的利用 畜禽粪便的高效利用主要是基于沼气的循环农业利用模式,通过不同畜禽粪便干物质的产气因子可以估算其沼气生产能力。

1.2 数据来源及数据处理方法

1.2.1 数据来源 本研究选取的研究区域为我国华东地区,包括上海、江苏、浙江、安徽、福建、江西、山东等地区。本研究中的农作物产量及畜禽量的原始数据参考《2015 中国农业统计资料》^[25],所有相关数据均指 2015 年的年度数据。

表 4 畜禽粪便其他系数

畜禽	粪便类型	可收集系数	干物质含量(%)	干物质产气因子 (m ³ /kg)	折标煤系数
肉猪	粪便	0.9	20.0	0.42	0.471
	尿液	0.9	0.4		
母猪	粪便	0.9	18.0	0.42	0.471
	尿液	0.9	0.6		
奶牛	粪便	0.6	20.0	0.30	0.429
	尿液	0.6	0.4		
牛	粪便	0.6	20.0	0.30	0.429
	尿液	0.6	0.4		
肉禽	粪便	0.6	30.0	0.49	0.643
蛋禽	粪便	0.6	30.0	0.49	0.643
马	粪便+尿液	—	25.0	0.30	0.500
羊	粪便+尿液	—	35.0	0.21	0.500
驴/骡	粪便+尿液	—	25.0	0.35	0.500

注:“—”表示由于收集性太差,不予考虑。表 6 同。

1.2.2 数据处理方法 鉴于畜禽粪便的尿液量巨大,其中干物质含量远小于粪便,本研究将其转换为干物质进行比较;为与秸秆进行横向比较,本研究中的秸秆和畜禽粪便均转换为标煤量。在生物质资源的统计中,各种资料出处、年代、统计方法不尽相同,完整性也不够^[3],这些问题在涉及畜禽粪便资源的计算上显得尤为突出。由于各牲畜的生长周期不一致,因此对各畜禽数量和生长周期做如下规定:牛分为奶牛和其他牛,其他牛主要是肉牛,饲养时间以 365 d 计算,数量以年存栏量为准;猪分为肉猪和母猪,肉猪以当年出栏量为准,平均饲养周期为 150 d,母猪以年度存栏量为准,饲养周期为 365 d;羊包括山羊和绵羊,以年出栏量作为统计数据,饲养周期为 365 d;马、驴、骡存栏量作为统计数据,饲养周期按 365 d 计算;家禽包括鸡、鸭、鹅等,其中鸡的占比最大,由于选取的统计资料不公布鸭、鹅的饲养量,且近年又不再单独公布蛋鸡和肉鸡的饲养量,综合比较往年数据后,本研究以统计资料的家禽出栏量为准,肉禽占 80%,饲养周期以 60 d 计算,蛋禽占 20%,饲养周期以 365 d 计算^[1,21]。马、羊、驴、骡粪便的折标煤系数均为大概值,根据其粪便热值估算得出。

2 结果与分析

2.1 秸秆资源量

由表 5 可知,2015 年我国华东地区的秸秆资源总量达到 22 074.1 万 t,约占全国秸秆资源总量的 22.4%,折合标准煤为 10 821.3 万 t。小麦、玉米、稻谷秸秆是该地区最重要的 3 种秸秆资源,年秸秆资源总量均超过 4 000 万 t,小麦秸秆资源量高达 6 816.1 万 t,占整个华东地区所有秸秆资源总量的 30.9%。山东地区的小麦秸秆资源产量最高,为 3 205.5 万 t,其次分别是安徽、江苏地区,分别为 1 927.4 万、1 603.7 万 t。稻谷秸秆则主要集中在江西、江苏、安徽等地区。山东秸秆资源非常丰富,其资源总量占整个华东地区的 42.4%。在秸秆的可利用量方面,华东地区的秸秆可利用量为 17 595.5 万 t,折合标准煤为 8 703.8 万 t。由于玉米秸秆的可收集性较好,在华东地区尽管小麦秸秆资源量高于玉米,但在可利用量上玉米秸秆以 5 447.1 万 t 超过了小麦的 5 043.9 万 t。

由图 1 可知,华东地区的小麦秸秆资源量占全国小麦秸

表 5 2015 年华东地区秸秆资源量

农作物	华东各地区秸秆资源量(万 t)							资源量合计 (万 t)	资源总量折标煤量 (万 t)	可利用量 (万 t)	可利用量折标准煤量 (万 t)
	上海	江苏	浙江	安徽	福建	江西	山东				
稻谷	52.4	1 216.4	360.2	909.1	302.2	1 262.9	59.2	4 162.4	1 785.7	3 121.8	1 339.3
小麦	27.2	1 603.7	47.9	1 927.4	0.8	3.6	3 205.5	6 816.1	3 408.0	5 043.9	2 521.9
玉米	4.2	504.4	62.2	992.6	43.0	25.6	4 101.8	5 733.8	3 033.2	5 447.1	2 881.5
其他杂粮	4.5	76.2	11.3	4.7	2.3	1.7	7.5	108.2	54.1	86.6	43.3
豆类	1.2	110.3	53.7	201.0	35.0	49.7	58.2	509.0	276.4	407.2	221.1
薯类	0.3	16.5	30.4	16.4	64.2	35.7	87.0	250.4	121.7	200.3	97.3
油料	2.4	286.2	62.7	455.7	61.3	247.9	648.2	1 764.4	933.4	1 552.7	821.4
棉花	1.2	35.1	6.0	70.1	0.0	34.6	161.1	308.0	167.2	277.2	150.5
甘蔗	0.1	0.9	6.2	2.0	4.4	6.6	0.0	20.2	8.9	17.8	7.8
蔬菜	36.5	559.6	180.7	271.4	190.4	135.9	1 027.3	2 401.7	1 032.7	1 441.0	619.6
合计	129.8	4 409.2	821.3	4 850.5	703.5	1 804.1	9 355.7	22 074.1	10 821.3	17 595.5	8 703.8

秆资源总量的比例最高,为 38.3%,其次是稻谷、蔬菜秸秆资源量,两者占全国稻谷、蔬菜秸秆资源总量的比例均超过 30%,分别为 32.1%、30.6%。油料作物秸秆资源量占全国油料秸秆资源总量的 24.9%,排在第 4 位。尽管玉米秸秆是华东地区可利用量最高的秸秆资源,但华东地区的玉米秸秆资源量仅占全国玉米秸秆资源总量的 12.8%。甘蔗秸秆资源量仅占全国甘蔗秸秆资源总量的 1.7%,排名最后。

2.2 畜禽粪便资源量

由表 6 可知,2015 年我国华东地区的畜禽粪便资源干物质总量为 6 160.6 万 t,约占全国畜禽粪便资源干物质总量的 18.6%,折合标准煤为 3 400.4 万 t;畜禽粪便干物质可利用量为 3 161.8 万 t,折合标准煤为 1 757.9 万 t。家禽是我国华东地区粪便资源干物质质量最高的种类,其年粪便干物质总量高达 2 862.6 万 t,折合标准煤为 1 840.7 万 t;其次是牛(包括奶牛和其他牛)、羊,其年粪便干物质总量分别为 1 345.6

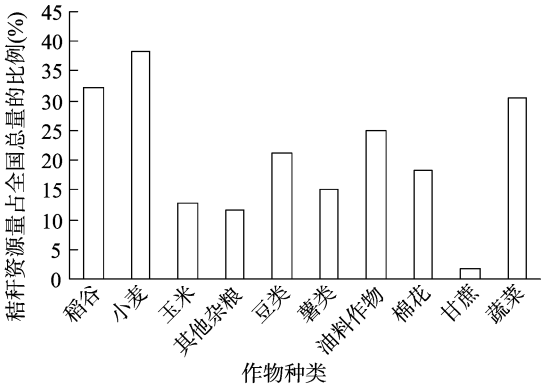


图1 华东地区各类秸秆资源产量占全国总量的比例

万、1 220.7 万 t。就整个华东地区而言,由于山东的畜禽养殖业发达,其畜禽粪便资源总量占整个华东地区的 45.3%。

表 6 华东地区畜禽粪便干物质资源量

畜禽	华东各地区畜禽粪便干物质资源量(万 t)							干物质量 合计(万 t)	干物质总量折标 准煤量(万 t)	干物质可利 用量(万 t)	可利用干物质折 标准煤量(万 t)
	上海	江苏	浙江	安徽	福建	江西	山东				
肉猪	7.0	102.1	45.1	102.1	58.5	111.1	165.7	591.7	253.8	532.5	228.4
母猪	1.5	18.0	7.5	16.7	13.6	20.2	38.5	116.0	49.8	104.4	44.8
奶牛	13.6	46.8	10.3	30.4	11.7	16.8	312.1	441.7	208.0	265.0	124.8
其他牛	0.1	10.6	10.5	150.3	61.8	303.5	367.1	903.9	425.7	542.3	255.4
家禽	12.5	474.8	98.1	486.0	341.4	307.7	1 142.0	2 862.6	1 840.7	1 717.6	1 104.4
马	0.0	0.4	0.0	0.1	0.0	0.0	3.6	4.2	2.1	—	—
驴/骡	0.0	4.0	0.0	0.3	0.0	0.0	15.6	19.9	10.0	—	—
羊	10.1	138.8	37.7	228.9	42.5	19.4	743.4	1 220.7	610.4	—	—
合计	44.8	795.5	209.3	1 014.8	529.5	778.7	2 788.0	6 160.6	3 400.4	3 161.8	1 757.9

由图 2 可知,华东地区家禽的粪便干物质质量占全国家禽粪便干物质总量的比例最高,为 48.6%,在全国范围内的整体优势非常突出;其次是肉猪、母猪的粪便干物质质量,分别占全国家禽粪便干物质总量的 21.2%、19.3%;马的粪便干物质资源量仅占全国马的粪便干物质资源总量的 0.5%,排名最后。

2.3 农业废弃物综合利用

以华东地区的秸秆可收集量为基数,结合蔡亚庆等对华东地区秸秆用途比例的研究成果^[2],计算 2015 年华东地区秸秆可能源化总量和比例如图 3 所示,上海地区的秸秆可能源化比例最高,为 62.9%,但由于基数小,其可能源化秸秆总量

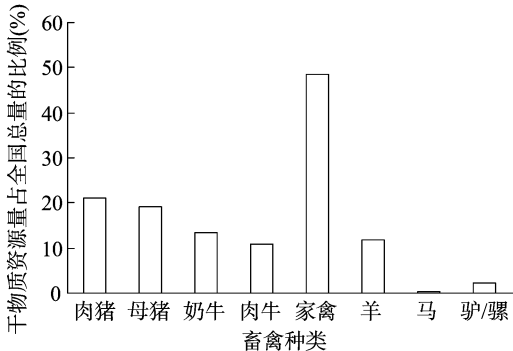


图2 华东地区各畜禽粪便干物质资源产量占全国总量的比例

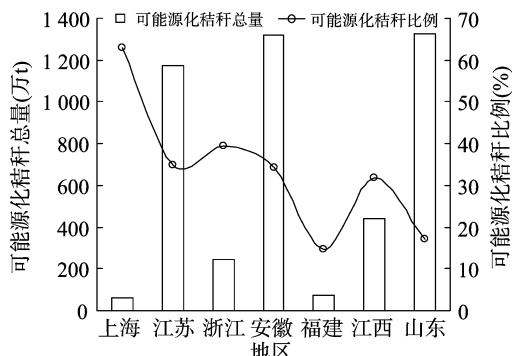


图3 2015年华东地区可能源化秸秆总量和比例

仅为58.7万t；福建地区的秸秆可能源化比例最低，仅为14.6%，其可能源化秸秆的总量为76.1万t；山东、安徽、江苏等地区是秸秆可能源化总量最高的3个地区，均超过1000万t，但三者的秸秆可能源化比例却差别较大，安徽、江苏地区的比例分别为34.2%、34.9%，山东地区的仅为17.1%。

除可能源化用途外，秸秆还可以用于农村生活燃料、饲料、秸秆还田、工业原料、食用菌基料等。秸秆可能源化比例越低，说明在其他用途上使用的比例越高。综合考虑90%的干物质分数和 $0.3\text{ m}^3/\text{kg}$ 的秸秆产气率^[1]后，2015年华东地区可收集的秸秆总资源可生产沼气475.1亿 m^3 。实际上在考虑了其他用途后，华东地区的秸秆沼气可开发潜力为125.2亿 m^3 ，山东、安徽、江苏等地区的可能源化秸秆的沼气可开发潜力分别为35.9亿、35.6亿、31.7亿 m^3 。福建、上海地区排在最后，分别为2.1亿、1.6亿 m^3 。在畜禽粪便方面，结合干物质产气量因子，华东地区2015年的畜禽粪便沼气最大潜力为236.8亿 m^3 ，上海、江苏、浙江、安徽、福建、江西、山东等地区分别为1.6亿、33.1亿、8.4亿、39.1亿、22.9亿、30.6亿、101.2亿 m^3 。在考虑了畜禽粪便的可收集性后，华东地区2015年的畜禽粪便沼气可开发潜力为135.1亿 m^3 ，山东地区的潜力最高，为83.2亿 m^3 ，其次是安徽、江西、江苏等地区。

总的来看，华东地区2015年可利用的农业废弃物资源的沼气开发潜力约为260.3亿 m^3 ，排在前三位的山东、安徽、江苏地区分别为89.4亿、57.7亿、51.2亿 m^3 。结合2015年华东地区农业沼气实际生产量（包括户用沼气和农业废弃物沼气工程）^[25]可以得出华东地区农业废弃物沼气的已开发率，由图4可知，福建地区的沼气已开发率最高，达到18.6%，其次是江西、浙江地区，分别为16.2%、11.2%；江苏、安徽地区的沼气已开发率较低，分别仅为6.3%、4.9%。

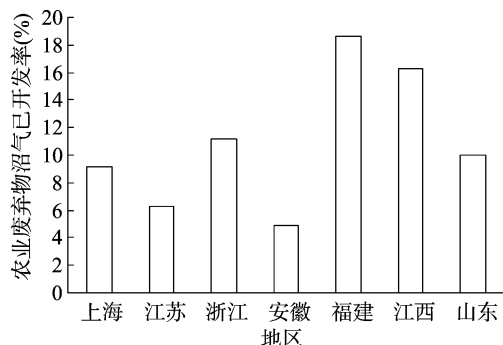


图4 2015年华东地区农业废弃物沼气已开发率

3 结论与讨论

2015年我国华东地区的秸秆资源总量为22074.1万t，约占全国秸秆资源总量的22.4%；山东地区秸秆资源量最高，达到9355.7万t，占到整个华东地区的42.4%。华东地区秸秆可利用量为17595.5万t，折合标准煤8703.8万t。在可利用量中，玉米和小麦秸秆可利用量最高，分别为5447.1万、5043.9万t。

2015年我国华东地区的畜禽粪便的干物质量为6160.6万t，约占全国畜禽粪便干物质总量的18.6%，折合标准煤3400.4万t。在可利用量中，猪粪、牛粪、家禽粪便被认为是较易收集的粪便资源，考虑了收集系数后，其可收集的干物质总量为3161.8万t。家禽粪便是华东地区最重要的畜禽粪便资源。山东地区的畜禽粪便总资源量占到了整个华东地区的45.3%。

2015年我国华东地区可作为能源化原料的秸秆资源具有125.2亿 m^3 的沼气开发潜力，畜禽粪便资源具有135.1亿 m^3 的沼气开发潜力，合计260.3亿 m^3 。结合开发潜力和实际生产情况，福建地区的沼气已开发率在华东地区最高，为18.6%。江苏、安徽地区较低，分别为6.3%、4.9%，开发潜力还很大。

本研究选取的畜禽粪便排泄系数参考自2009年中国农科院和环保部联合编写的《第一次全国污染源普查畜禽养殖业源产排污系数手册》^[20]，相关系数为华东区系数，与目前通常的全局范围内选取同一个系数相比准确度较高。在该系数中，猪的排泄系数显著低于常见的研究，而家禽（鸡）的排泄系数显著高于常见的研究，这也是本研究研究结果和类似研究有较大不一致的地方。

在畜禽粪便的可利用量评价中，本研究选取的易于收集粪便的畜禽种类和可收集系数参考石元春的相关论述^[21]并做了细微调整。未列入可收集利用量的其他畜禽不代表其粪便不能收集利用，只是在量级上有较大的差距。

在考虑了农村生活能源、饲料、秸秆还田、食用菌基料后，在华东地区实际上还有大量富足的秸秆并未被很好利用，该地区的农业废弃物的沼气可开发潜力巨大。未来如何综合利用好该区域数量巨大的农业废弃物资源将是一个非常重要的现实问题。

参考文献:

- [1] 陈利洪. 中国生物质废弃物资源空间分布及其燃气潜力[M]. 北京: 中国农业出版社, 2015.
- [2] 蔡亚庆, 仇焕广, 徐志刚. 中国各区域秸秆资源可能源化利用的潜力分析[J]. 自然资源学报, 2011, 26(10): 1637-1646.
- [3] 石元春. 中国生物质原料资源[J]. 中国工程科学, 2011, 13(2): 16-23.
- [4] 王亚静, 毕于运, 高春雨. 中国秸秆资源可收集利用量及其适宜性评价[J]. 中国农业科学, 2010, 43(9): 1852-1859.
- [5] 崔明, 赵立欣, 田宜水, 等. 中国主要农作物秸秆资源能源化利用分析评价[J]. 农业工程学报, 2008, 24(12): 291-296.
- [6] 张宝悦, 王新钢, 王激清. 农业废弃物资源化利用视角下的农业循环经济发展模式[J]. 黑龙江畜牧兽医, 2015(4): 5-7.
- [7] 田宜水. 中国规模化养殖场畜禽粪便资源沼气生产潜力评价

朱学亮, 罗文亚, 李 光, 等. γ -聚谷氨酸水凝胶对 Cd^{2+} 、 Pb^{2+} 的吸附性能[J]. 江苏农业科学, 2018, 46(13): 255-259.
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2018.13.059

γ -聚谷氨酸水凝胶对 Cd^{2+} 、 Pb^{2+} 的吸附性能

朱学亮, 罗文亚, 李 光, 陈双喜

(河南大学生命科学学院微生物工程研究所, 河南开封 475004)

摘要:以 γ -聚谷氨酸(γ -PGA)为原料, 乙二醇缩水甘油醚为交联剂, 采用溶液聚合法合成了新型 γ -PGA 水凝胶重金属吸附剂(γ -PGA-GDE), 并研究 γ -聚谷氨酸水凝胶对 Cd^{2+} 、 Pb^{2+} 的吸附特性。采用傅里叶红外光谱及扫描电镜对吸附材料进行表征, 同时研究 pH 值、温度、吸附时间和重金属离子初始浓度对 γ -聚谷氨酸水凝胶吸附特性的影响。结果表明, pH 值为 5 利于 γ -聚谷氨酸水凝胶对重金属离子的吸附, 温度对其吸附重金属离子影响不大。 γ -聚谷氨酸水凝胶对 Cd^{2+} 、 Pb^{2+} 重金属离子的吸附速率非常快, 符合准二级动力学方程。其对重金属的吸附符合 langmuir 等温式, 对 Pb^{2+} 、 Cd^{2+} 饱和吸附量分别为 526.22、255.54 mg/g, 与试验值非常接近。 γ -聚谷氨酸水凝胶经盐酸洗脱可再生, 再生后可循环使用至少 6 次。

关键词: γ -聚谷氨酸; 水凝胶; 电感耦合等离子体发射光谱仪; 重金属; 吸附

中图分类号: X703 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-1302(2018)13-0255-05

随着工业化迅猛发展, 特别是含重金属工业废水的排放, 使得环境中积累了大量的重金属, 由于重金属具有高毒、难降解等特性, 严重危害人类健康和社会可持续发展, 所以, 重金属污染的治理已经成为一个亟需解决的全球性问题^[1-2]。铅

(Pb)和镉(Cd)是2种对人体毒性高且无生理功能的重金属元素^[3], 即使微量也会对成年人和儿童的健康造成极大的损害^[4]。有研究显示, 儿童体内 Pb 含量一旦高出 100 $\mu\text{g/L}$ 时, 会影响儿童脑部发育, 且 Pb 每上升 100 $\mu\text{g/L}$ 时, 儿童的智力会下降 1~3 分^[5]。此外, Cd 会引起肺癌、肺腺癌、前列腺增生病变、骨折、肾功能不全和高血压等诸多疾病^[6]。目前, 重金属污水处理中所使用的物理化学及生物方法包括化学沉淀、离子交换、过滤、反渗透、吸附、膜生物反应器和电化学等。其中吸附法因其成本低、效率高、可选择吸附剂多等诸多优点而被广泛用于重金属污染的处理。而在所有吸附剂中, 生物质吸附剂的开发受到人们的高度重视^[7]。

收稿日期: 2017-09-03

基金项目: 河南省科技发展规划(编号: 152102210049)。

作者简介: 朱学亮(1991—), 男, 河南长葛人, 硕士研究生, 主要研究方向 γ -聚谷氨酸发酵过程的调控及其实际应用。E-mail: 513061038@qq.com。

通信作者: 陈双喜, 博士, 教授, 主要研究方向微生物资源开发与利用。Tel: (0371) 23887799; E-mail: csx1231@126.com。

[J]. 农业工程学报, 2012, 28(8): 230-234.

[8] Chen L H, Cong R G, Shu B R, et al. A sustainable biogas model in China; the case study of Beijing Deqingyuan biogas project [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2017, 78: 773-779.

[9] 韦佳培, 刘源源. 我国资源性农业废弃物价值的时空分异[J]. 求索, 2014(6): 65-70.

[10] 李国志, 王焱冰. 农户秸秆资源化利用的影响因素分析[J]. 江苏农业科学, 2017, 45(16): 291-294.

[11] 杨 捷, 吕卫光. 上海崇明岛农作物秸秆的利用现状和技术对策研究[J]. 中国农学通报, 2009, 25(3): 271-274.

[12] 郑 军, 史建民. 我国农作物秸秆资源化利用的特征和困境及出路——以山东为例[J]. 农业现代化研究, 2012, 33(3): 354-358.

[13] 王雨辰, 陈 浮, 朱 伟, 等. 江苏省秸秆资源量估算及其区域分布研究[J]. 江苏农业科学, 2013, 41(6): 305-310.

[14] 黄红英, 常志州, 叶小梅, 等. 区域畜禽粪便产生量估算及其农田承载预警分析——以江苏为例[J]. 江苏农业学报, 2013, 29(4): 777-783.

[15] 顾骅珊. 农业废弃物的循环利用模式探讨——以浙江嘉兴为例[J]. 嘉兴学院学报, 2009(1): 47-51.

[16] 吴志坚, 吴志勇, 徐晓云, 等. 畜禽粪便综合养分管理计划在规模猪场的实践探索——以江西绿丰生态农业园有限公司为例

[J]. 江西畜牧兽医杂志, 2015(3): 1-6.

[17] 王晓玉. 以华东、中南、西南地区为重点的大田作物秸秆资源量及时空分布的研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2014: 32-40.

[18] 田宜水, 赵立欣, 孙丽英, 等. 农业生物质能资源分析与评价[J]. 中国工程科学, 2011, 13(2): 24-28.

[19] 龚海涛, 张晟义. 新疆能源生物质资源的估算及分布特点[J]. 新疆财经, 2011(2): 50-54.

[20] 中国农业科学院农业环境与可持续发展研究所, 环境保护部南京环境科学研究所. 畜禽养殖业产污系数与排污系数手册[Z/OL]. [2017-12-14]. <https://wenku.baidu.com/view/c1ee9509581b6bd97f19ea00.html>.

[21] 石立春. 决胜生物质[M]. 北京: 中国农业大学出版社, 2011: 298-299.

[22] 张 田, 卜美东, 耿 维. 中国畜禽粪便污染现状及产沼气潜力[J]. 生态学杂志, 2012, 31(5): 1241-1249.

[23] 宋 立, 邓良伟, 尹 勇, 等. 羊、鸭、兔粪厌氧消化产沼气潜力与特性[J]. 农业工程学报, 2010, 26(10): 277-282.

[24] 汤云川, 张卫峰, 马 林, 等. 户用沼气产气量估算及能源经济效益[J]. 农业工程学报, 2010, 26(3): 281-288.

[25] 中华人民共和国农业部. 2015 中国农业统计资料[M]. 北京: 中国农业出版社, 2016: 180-183.