

灰色系统理论在非粮柴油植物评价与筛选中的应用

薛帅 秦烁 王继师 梁振兴 谢光辉*

(中国农业大学 农学与生物技术学院/国家能源非粮生物质原料研发中心,北京 100193)

摘要 利用灰色关联度法对油脂植物的主要性状进行综合分析,为评价及筛选优质非粮柴油植物提供科学参考。本研究选取9项评价指标并运用独立性权数法确定了其权重系数,总体变幅为0.085~0.186,其中碘值(0.136)与高热值(0.120)的权重较高,其余7项指标间差异不大。以秦岭地区23份符合柴油植物初步评价标准的野生资源为材料,分别利用等权关联度法与加权关联度法确定其与构建的理想物种间的关联度,并用于综合评价与筛选。结果表明:基于等权法的关联度变幅为0.9065~0.9851,前三名优势物种为山桃($\gamma=0.9851$)、粗榧($\gamma=0.9842$)与李($\gamma=0.9839$);基于加权法的关联度变幅为0.9126~0.9849,前三名优势物种为山桃($\gamma=0.9849$)、李($\gamma=0.9839$)与粗榧($\gamma=0.9837$)。基于两种评价方法下的23份资源综合品质排名差异不显著($P<0.01$),其秩相关系数达到0.998,说明所选9项指标对评价非粮柴油植物综合品质具有同等重要性,同时也表明等权关联度法可直接用于评价与筛选。

关键词 油脂植物; 能源植物; 植物资源; 灰色关联度; 综合评价

中图分类号 Q 949.93; N 941.5

文章编号 1007-4333(2012)06-0225-06

文献标志码 A

Application of grey system theory in evaluation and screening of no-food biodiesel plant resources

XUE Shuai, QIN Shuo, WANG Ji-shi, LIANG Zhen-xing, XIE Guang-hui*

(College of Agronomy and Biotechnology/National Energy R&D Center for Non-food Biomass,

China Agricultural University, Beijing 100193, China)

Abstract In order to effectively evaluate and screen no-food biodiesel plant (NFBP) resources, nine characteristics of NFBP were evaluated comprehensively using the grey system analysis and the independibility weight was introduced in this study. The result showed that the weight coefficients varied from 0.090 to 0.136 and the first two highest weight coefficients were iodine value (0.136) and heating value (0.120). While the weight coefficients of other 7 indicators including the oil content, acid value, kinematic viscosity, cetane number, density, cold filter clogging temperature as well as the seed yield were all stable at 0.10. The equal-weight and weighting coefficients between the 23 oil species which satisfied the NFBP standards well and the simulated ideal specie were calculated and used for further screening. The result further exhibited that the equal-weight coefficient varied from 0.9065 to 0.9851 and the top species were *Prunus davidiana* Carr. ($\gamma=0.9851$), *Cephalotaxus sinensis* Li. ($\gamma=0.9842$) and *Prunus salicina* Linn. ($\gamma=0.9839$), respectively. Comparatively, the weighting coefficient varied from 0.9126 to 0.9849 and the top three species were *Prunus davidiana* Carr. ($\gamma=0.9849$), *Prunus salicina* Linn. ($\gamma=0.9839$) and *Cephalotaxus sinensis* Li. ($\gamma=0.9837$), respectively. *Clerodendrum trichotomum* Thunb. performed the poorest property compared to the rest species based on both methods. For the 23 plant species, the results of the two ranking methods were highly significantly ($P<0.01$) correlated with a correlation coefficient of 0.998. Our results also demonstrated that the 9 evaluation indicators

收稿日期: 2012-01-13

基金项目: 国家科技基础性工作专项重点项目(2008FY110400)

第一作者: 薛帅, 硕士研究生, E-mail: tiger_shuai@hotmail.com

通讯作者: 谢光辉, 教授, 主要从事非粮生物质原料研究, E-mail: xiegh@cau.edu.cn

generally reflected the NFBP property and that the equal-weight grey system analysis could be directly used for NFBP evaluation and screening.

Key words oil plant; energy plant; plant resource; grey related degree; comprehensive evaluation

能源既是人类赖以生存的物质基础,也是国家和社会发展的重要保障。过去200年中,化石燃料的大规模应用造就了人类灿烂的当代文明也促进了人类社会的快速发展。但是随着对化石能源过强依赖性给现代社会生态环境、经济发展甚至政治格局造成的负面影响的显现,各国政府都将能源问题定义为关乎国家社会可持续发展的重大战略问题。相应的,国内外的能源研究人员正积极探索与发展可替代燃料及可再生能源。生物柴油作为具有潜力的清洁可替代燃料之一,近些年来也进入到了快速发展期,但是原料供应不足已成为其发展的瓶颈。由此可见,保障原料油脂的可持续供应是产业发展的关键。在全球范围内,现阶段已经商业化生产的生物柴油的原料主要是大豆、油菜、棕榈等食用基油脂。但是我国国情决定我们生物柴油产业的发展必须严格遵循“非粮”原则,因此寻求适合的非粮生物柴油植物类型是解决我国生物柴油产业“瓶颈”的唯一途径。

非粮柴油植物指用于提炼生物柴油的非传统粮油及蔬菜类油脂植物^[1]。优质油脂植物资源^[2]及低成本原料生产技术匮乏是我国生物柴油产业发展的瓶颈。为此,应尽快确立柴油植物品质评价的标准体系,从植物学、化学、农学等多方面对其综合品质做出定性与定量的等级判定。林铎青等^[2]结合油脂的脂肪酸组成及其理化性质与生物柴油质量指标之间的联系,参考我国及欧美主要国家的生物柴油标准,确定了非粮柴油植物的初步评价标准体系,认为有潜力的柴油植物应具较高的油脂产量,且其油脂甲酯有良好的燃烧性能和低温流动性能。此标准在资源初步筛选过程中行之有效,但缺乏综合评价及定量分析,在确定优先发展物种中人为主观性影响较严重^[3-4]。为了对参评物种做出全面而客观的评价,提出一种既综合考虑主要评价指标,又避免主观随意性的评价方法显得至关重要。

灰色关联度分析法作为将灰色系统中各要素进行综合描述和量化评估的一种方法,可以对其系统要素进行全面、客观的评价^[5]。其通过构建或设定理想条件下有关数据作为母因素,然后计算系统中各子因素与母因素间的关联度,以关联度来描述母

子因素关系强弱、大小和优劣并已成功应用于作物育种学^[6-7]、食品科学^[8]及生态学^[9]等领域,其积极意义与实用性能已得到肯定。非粮柴油植物评价时需要考虑的因素并非单纯的高含油量与高产量,并且需要考虑其油脂性质、油脂甲酯性质等多方面因素。传统的专家经验评价法虽然可以对以上因素综合考虑,但是人为主观性影响较大,评价结果科学性及其说服力较差。但是用灰色关联分析方法能够在一定程度上克服以上局限性,避免不同评价主体间分析结果不相符的现象。本研究应用灰色关联度分析法对23种油脂植物进行深入分析,通过比较参评样品与构建理想物种间相似程度而确定其优劣程度,进而对参评物种做出综合评价,以期确定优先开发物种提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

2009年与2010年期间6次在陕西省与山西省19个样点县进行野外考察与样品采集,共收集到本地区蕴藏量较大的野生油脂植物资源85份。所有样品果实均在成熟期采集,并及时进行处理和理化分析。基于测定结果,通过比对非粮柴油植物初步评价标准,筛选出23份^[3,10]有进一步研究价值的资源并在本研究中给予深入分析。

1.2 主要评价指标的筛选与测定

影响植物油脂做生物柴油原料的综合品质主要有诸如酸值、碘值^[1]的油脂性质指标;油脂甲酯性质指标,主要包括密度、十六烷值、冷滤点、运动黏度、高热值^[11-12];产油量指标主要是含油器官的含油率及产量,这也是当前评价与筛选柴油植物的重点考察内容。

油脂性质指标的测定方法与油脂甲酯指标的估测方法见薛帅等的研究^[3](表1)。产油量指标分级采用的是十级分类法^[13]:根据采集样品的野外表现估测其含油器官的单株产量与单株所占面积,进而估算出其单位面积的产量;根据单位面积产量(X_i)的平均数(\bar{x})、标准差(s)将材料分级,每 $0.5s$ 为1级,从第1级 $X_i < (\bar{x} - 2s)$ 到第10级 $X_i \geq (\bar{x} + 2s)$,分级结果见表1。

表1 23份柴油植物和理想型物种样品评价指标的原始值

Table 1 Raw values of 9 evaluation indicators of 23 plant species and the constructed ideal species

编号	中文名	含油率/ %	酸值/ (mg/g)KOH	碘值/ (g/100 g)I ₂	运动黏度/ (mm ² /s)	十六 烷值	密度/ (kg/m ³)	高热值/ (kJ/g)	冷滤点/ ℃	产量 等级
0	理想物种	62.78	2.15	59.91	2.7	65	890	42.91	-13.10	10
1	黑刺蒺藜	10.04	9.42	77.76	3.56	49.71	863.25	39.59	-5.14	5
2	海州常山	38.09	57.92	83.70	3.80	51.92	871.20	40.88	-11.12	3
3	厚朴	42.18	11.21	71.71	3.67	52.08	866.89	40.58	-7.69	6
4	猫儿屎	32.28	8.64	78.79	4.15	54.24	882.92	41.36	-13.10	7
5	女贞	11.23	7.68	83.28	3.86	53.09	873.19	42.91	-6.92	10
6	山桃	49.43	1.89	89.02	4.16	57.57	883.20	35.16	-11.49	10
7	直角荚蒾	13.24	22.67	82.76	3.72	49.87	868.69	40.46	-10.50	7
8	茶	17.41	5.03	76.36	3.93	56.31	875.61	40.44	-8.02	6
9	美洲商陆	11.84	6.24	76.38	3.88	53.13	873.96	41.79	-9.81	3
10	酸枣	31.20	2.40	65.57	3.88	52.61	873.95	33.40	-6.56	5
11	益母草	33.48	11.80	93.83	4.02	53.11	878.53	39.52	-6.20	5
12	川榛	39.46	2.15	90.90	3.87	51.69	873.56	35.31	-11.63	5
13	望春玉兰	52.30	4.10	93.88	3.61	50.54	864.88	40.73	-5.22	5
14	李	43.71	2.89	83.70	3.89	59.47	874.25	41.19	-11.89	8
15	粗榧	62.78	2.17	77.89	3.66	53.05	866.66	41.82	-8.01	4
16	巴山冷杉	28.30	46.50	82.04	4.01	55.86	878.24	41.00	-7.01	4
17	华山松	54.90	5.44	96.38	4.00	55.24	877.96	41.88	-8.89	4
18	红松	45.30	2.20	77.13	3.87	52.86	873.63	40.22	-4.65	4
19	白杜卫矛	41.89	12.76	80.42	3.79	54.10	871.02	39.71	-8.03	3
20	栾树	25.50	13.50	82.46	4.16	56.47	883.08	41.67	-11.18	5
21	梧桐	32.40	10.57	74.31	3.62	47.17	865.40	30.78	-5.48	3
22	五味子	38.80	17.16	59.91	3.80	54.84	871.08	41.02	-2.33	7
23	苍耳	11.72	6.20	82.25	3.86	53.67	873.14	40.37	-1.12	5

1.3 分析方法

依据灰色系统理论将23份资源看成一个灰色系统,而每份资源则是该系统中的一个因素。根据非粮柴油植物评价标准构建理想物种,通过比较参评样品与理想物种间相似程度(以关联度表示)确定其优劣程度。

1.3.1 构建理想物种

根据压缩内燃机对优质生物柴油性能的要求并结合非粮柴油植物评价标准,构建理想物种的各性状指标(表1中0号);其中含油率与热值取23份资

源中的最高值,而酸值、碘值与冷滤点取最低值;十六烷值与密度选取评价标准中的最大适宜值;运动黏度为0号石化柴油40℃时的值。

1.3.2 计算关联系数

由于各评价指标的量化值所在区间不完全相同,而不同量纲之间不便于比较,因此在进行灰色关联分析前应首先对各指标进行无量纲化处理。本研究采用初值化法对表1中的所有原始数据进行无量纲化处理。

基于无量纲化后的数据,利用公式(1)^[14]计算

各参评物种与理想物种间的关联系数。

$$\xi_{i(k)} = \frac{\min_i \min_k \Delta_{i(k)} + \rho \max_i \max_k \Delta_{i(k)}}{\Delta_{i(k)} + \rho \max_i \max_k \Delta_{i(k)}} \quad (1)$$

式中： $\xi_{i(k)}$ 为关联系数； $\Delta_{i(k)}$ 表示第*i*个物种与理想物种在第*k*个指标无量纲数据的绝对差值； $\min_i \min_k \Delta_{i(k)}$ 与 $\max_i \max_k \Delta_{i(k)}$ 分别表示 $\Delta_{i(k)}$ 的二级最小值与二级最大值； ρ 为分辨系数，一般取0.5。

1.3.3 计算各物种与理想物种间的等权关联度与加权关联度

根据得到的关联系数可以确定各参评物种与理想物种间的关联度，进而确定其优劣程度。一般有等权相关度与加权相关度：当各评价指标在重要性同等条件下，可利用公式(2)^[14]计算出等权关联度；一般情况下，各个指标的重要性是不相同的，必须用加权关联度才能正确评价，计算方法见公式(3)^[14]。

$$\gamma_i = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \xi_i(k) \quad (2)$$

表2 各评价指标与总体品质的灰色关联度(γ)、排序及在评价中所占权重(W_k)

Table 2 Grey related degree(γ), ranking order and the weight coefficient (W_k) of the 9 evaluation indicators

指标名称	含油率	酸值	碘值	运动黏度	十六烷值	密度	高热值	冷滤点	产量等级
关联度(γ)	0.965	0.805	0.974	0.967	0.987	0.998	0.994	0.970	0.966
排序	8	9	4	6	3	1	2	5	7
权重(W_k)	0.106	0.106	0.136	0.091	0.116	0.090	0.120	0.119	0.116

2.2 各评价指标对参评样品综合性能的影响

采用式(2)求得各评价指标与综合性质的灰色关联度，并根据大小排序(表2)。非粮柴油植物的品质性状与其综合表现的灰色关联度顺序依次为：密度>高热值>十六烷值>碘值>冷滤点>运动黏度>含油器官产量>含油器官的含油率>酸值。依据灰色关联分析原则，灰色关联度大的数列与参考数列的关系最密切，相似程度最高，反之则低^[16]。在该分析中，非粮柴油植物油脂甲酯性质($\gamma_{\text{密度}} = 0.998$, $\gamma_{\text{高热值}} = 0.994$, $\gamma_{\text{十六烷值}} = 0.987$, $\gamma_{\text{碘值}} = 0.974$, $\gamma_{\text{冷滤点}} = 0.970$, $\gamma_{\text{运动黏度}} = 0.967$)与其综合表现关系最密切，其次为油脂产量($\gamma_{\text{产量等级}} = 0.966$, $\gamma_{\text{含油率}} = 0.965$)，油脂性质($\gamma_{\text{酸值}} = 0.805$)与综合性状的关联最低。上述结果表明，在筛选生物柴油原料物种时应首先考虑受原料组成较大影响的油脂甲酯性质，其次要考虑单位面积的油脂产量，再次考虑酸值等反映油脂性质的指标。

$$\gamma_i' = \sum_{k=1}^n W_k \times \xi_i(k) \quad (3)$$

式中： γ_i 与 γ_i' 分别表示等权关联度与加权关联度；*n*为评价指标的个数； $\xi_i(k)$ 为第*i*个物种第*k*个指标的关联系数； W_k 为第*k*个指标的权重，通过独立性权数法^[15]计算获得。

2 结果与分析

2.1 各评价指标权重系数的确定

由表2可见，采用独立性权数法求得9项评价指标的权重系数，总变幅为0.090~0.136。按照独立性权数法分析原则，每项指标与其它指标重复信息越多，权重系数应越小^[15]。在该研究中，所选择的9项指标在综合评价过程中所占权重差异不大，表明评价指标充分反应了材料的综合性质，对整体品质均起着重要作用，同时也表明所选的9项指标用于综合评价的合理性与全面性。

2.3 参评物种的综合表现

已知关联度越大，参评物种越接近理想物种。本研究分别采用式(2)与(3)求得23份参评物种与理想物种的等权关联度与加权关联度，依据大小排序(表3)。由等权关联度的排序结果可以看出，山桃与理想物种最为接近($\gamma_1 = 0.9851$)，综合性状最好，其次是粗榧($\gamma_2 = 0.9842$)与李($\gamma_3 = 0.9839$)；海州常山($\gamma_{31} = 0.9065$)与理想物种的关联度相差最大。由加权关联度的综合排序结果可以看出，山桃($\gamma_1' = 0.9849$)的综合表现最好，其次为李($\gamma_2' = 0.9839$)与粗榧($\gamma_3' = 0.9837$)；而海州常山($\gamma_{31}' = 0.9126$)同样表现最差。

等权关联度与加权关联度的序列分析结论基本一致(表3)，秩相关显著($r_{1,2} = 0.998$, $P < 0.01$)。在两种排序方式中，仅有部个别物种的名次略有出入，如粗榧在等权关联度排序为第2名，而在加权关联度排序中为第3名，主要是因为其碘值低和高热

值高等原因造成的。将利用灰色关联分析法与专家评判法的排序结果相比,不同物种优先度排序差异较大,但是均没有达到显著的差异水平,等权法、加权法与专家评判法排序的秩相关系数分别为 0.488 与 0.492($\gamma_{\text{临界}, P<0.05} = 0.485$)。

表 3 23 份非粮柴油植物的综合评价结果

Table 3 Comprehensive evaluation results of 23 non-food biodiesel plant resources

名称	等权法		加权法		专家评价法 排序
	关联度 γ	排序	关联度 γ'	排序	
山桃	0.985 1	1	0.984 9	1	1
粗榧	0.984 2	2	0.983 7	3	7
李	0.983 9	3	0.983 9	2	2
川榛	0.980 6	4	0.980 0	4	11
红松	0.979 0	5	0.978 5	6	12
酸枣	0.978 6	6	0.978 6	5	13
望春玉兰	0.972 3	7	0.979 7	7	6
茶	0.969 3	8	0.971 5	8	16
华山松	0.969 0	9	0.968 7	9	9
猫儿屎	0.963 7	10	0.964 8	10	4
美洲商陆	0.963 6	11	0.964 2	11	22
女贞	0.962 4	12	0.963 2	12	8
苍耳	0.959 1	13	0.959 2	13	18
厚朴	0.955 2	14	0.956 3	14	5
黑刺蒺藜	0.952 6	15	0.953 4	15	19
梧桐	0.950 0	16	0.950 6	16	20
白杜卫矛	0.949 2	17	0.950 2	17	21
栎树	0.949 6	18	0.950 1	18	14
益母草	0.948 1	19	0.948 7	19	10
五味子	0.943 5	20	0.944 8	20	3
直角荚蒾	0.933 3	21	0.937 3	21	15
巴山冷杉	0.909 7	22	0.916 4	22	17
海州常山	0.906 5	23	0.912 6	23	23

3 讨论与结论

非粮柴油植物的综合性质是多个因素共同决定的且各因素的影响程度不一,对来源不同的资源进行评价与筛选的关键是找出其中的主导因素。灰色

关联分析可以从多个因素中找出主要决定因素,为全面、科学评价资源的综合性能提供参考依据。

本研究表明,虽然非粮柴油的酸值与其综合性能的灰色关联度较小,但在资源筛选过程中仍可作为参考指标,主要因为现有生物柴油生产工艺已经可以提炼高酸值油脂^[17-18]。而剩余 8 项指标与其综合性能的灰色关联度均较大,说明这些指标在各个方面充分描述了非粮柴油植物的原料品质,且在筛选过程中重要性相当:密度与高热值决定着油脂甲酯的体积热值,是在不改动发动机前提下选择燃料类型的决定因素之一^[19];十六烷值与运动黏度体现了燃烧性能^[1];碘值与冷滤点反映了燃料的低温流动性能,是限制其使用区域的重要指标^[20];而含油器官的含油率与产量是决定着非粮柴油植物是否具有开发潜力的先决条件^[1]。基于各指标与柴油植物综合性能的关联度分析结果,本研究认为在筛选油脂植物过程中应首先利用油脂甲酯性质筛选,剔除不合格样品,再分析材料的产油能力,最终从其油脂性质层面确定优势物种。

该研究发现在对柴油植物资源评价过程中,等权关联度法与加权关联度法评价结果极显著相关($P<0.01$),说明:1)所选取的 9 项评价指标能够全面合理地反映非粮柴油植物做为生物柴油原料的综合品质且在评价、筛选中具有同等重要性;2)等权关联度法可以客观、合理地评价非粮柴油植物综合品质。另外,加权与等权关联度分析法和专家评判法排序显著相关的结果说明灰色系统分析法评价结果与专家鉴评结果相吻合,结果可靠。而灰色关联分析不仅具有可靠的统计学基础,且充分利用了柴油植物各性状全部信息,并通过构建最优的“理想物种”,既体现了优良柴油植物物种的要求,又从参评物种的实际情况出发,因而优先度排序更客观、合理。但是由于参评物种的多样性、有关“理想物种”的构造方法以及不同性状权重大小的不同分配导致同一参评物种在不同参评群体中的排序不固定。为了规范非粮生物柴油植物灰色系统评价法,可选择现阶段各方面表现最好的植物作为“最优物种”(固定的“理想物种”),这样既可以解决同一参评物种在不同参评群体中的排序不固定的问题,也保证筛选出的物种也更接近实际情况。

本研究将灰色系统理论首次应用于非粮柴油植物资源评价与筛选中,通过构建理想物种及分配各性状权重值实现了 23 份资源材料综合品质的量化

分析及排序,与以往评价方法相比减少了人为主观因素的影响,实现了合理、客观、全面的评价。结果表明山桃、粗榧与李是最具有开发潜力的非粮柴油植物物种。但是,这些潜力植物要实现规模化、产业化种植还要从其生态适应性、生育期、低成本生产技术及副产物开发等方面给予考虑,这也是下一步研究的重点内容。

参 考 文 献

- [1] 林铎青,邢福武.中国非粮生物柴油能源植物资源的初步评价[J].中国油脂,2009,34(11):1-7
- [2] 赵宗保,华艳艳,刘波.中国如何突破生物柴油产业的原料瓶颈[J].中国生物工程杂志,2005,25(11):1-6
- [3] 薛帅,秦烁,刘全儒,等.陕西省非粮柴油植物资源的调查与筛选[J].中国农业大学学报,2012,17(6):215-224
- [4] 危文亮,金梦阳.42份非木本油料植物资源的能源利用潜力评价[J].中国油脂,2008,33(5):73-76
- [5] 沈珍瑶,杨志峰.灰色关联分析方法用于指标体系的筛选[J].数学的实践与认识,2005(5):728-732
- [6] 范弘伟,宋同明,陈绍江,等.灰色系统理论在高油玉米授粉者选育中的应用[J].中国农业大学学报,2001,6(1):51-56
- [7] 肖平,龚秋林,高海军.灰色关联度在冬油菜种质资源创新评价中的应用[J].江西农业学报,2006,18(4):35-37
- [8] 张海英,韩涛,刘洁,等.应用灰色关联度分析法评价桃果实品质[J].北方园艺,2008(12):9-13
- [9] 袁晓奇,任树梅,杨培岭,等.大型节水改造灌区植物种类多样性评价分析[J].中国农业大学学报,2010,15(3):94-100
- [10] 薛帅.秦岭与中条山区非粮柴油植物资源评估与潜力物种筛选[D].北京:中国农业大学,2012
- [11] 黄忠水,纪威,姚亚光.玉米油试制生物柴油研究[J].农业工程学报,2003:155-157
- [12] 李克亚.生物柴油制备试验及数学模型研究[D].天津:天津大学,2008
- [13] 陈雪燕,王亚娟,雒景吾,等.陕西省小麦地方品种主要性状的遗传多样性研究[J].麦类作物学报,2007,27(3):456-460
- [14] 邹永红,谭建林.基于综合灰色关联度加权法的玉米品种评价[J].南方农业学报,2011,42(8):1007-1010
- [15] 王晖,陈丽,陈垦,等.多指标综合评价方法及权重系数的选择[J].广东药学院学报,2007,23(5):583-589
- [16] 郭瑞林.作物灰色育种学[M].北京:北京林业科技出版社,1995
- [17] 中国能源作物可持续发展战略研究编委会.中国能源作物可持续发展战略研究[M].北京:中国农业出版社,2009
- [18] Berchmans H J, Hirata S. Biodiesel production from crude *Jatropha curcas* L seed oil with a high content of free fatty acids[J]. Bioresource Technology, 2008, 99: 1716-1721
- [19] 梅德清,袁银南,王忠,等.生物柴油燃料特性的研究[J].可再生能源,2004,117(5):20-22
- [20] 陈秀,袁银男,来永斌,等.生物柴油组成与组分结构对其低温流动性的影响[J].石油学报,2009,25(5):674-677

责任编辑:袁文业