基于拉开档次法－TOPSIS 的煤尘抑制剂优选决策模型

陈沅江，袁 红

（中南大学 资源与安全工程学院，湖南 长沙 410083）

摘 要：[目的] 建立煤尘抑制剂优选决策模型，为煤尘抑制剂的科学评价及决策提供有益的理论参考。[方法] 通过引入 TOPSIS 方法（一种逼近理想解的排序方法），选取 7 个评价指标，采用拉开档次法确定指标权重，避免人为赋予指标权重的主观影响，提高了指标权重的科学性和客观性。[结果] 通过运用该评价模型对 10 项近 10 a 的煤尘抑制剂的研究成果进行评价，结果表明：降解型抑尘剂为最优方案，煤尘抑制剂次之，氧化淀粉接枝丙烯酸丙烯酰胺抑尘剂最差。[结论] 该模型通过定量的数据对抑尘方案的综合性能进行评价，有助于人们做出科学的决策。

关键词：煤尘抑制剂；拉开档次法；TOPSIS；优选决策模型

文献标识码：B **文章编号**：1000-288X(2018)03-0162-05 **中图分类号**：X45

文献参数：陈沅江，袁红. 基于拉开档次法—TOPSIS 的煤尘抑制剂优选决策模型[J]. 水土保持通报，2018，38(3)：162-166. DOI：10.13961/j.cnki.stbctb.2018.03.026. Chen Yuanjiang，Yuan Hong. Optimization decision model for coal dust inhibitors based on pull-up method coupling TOPSIS method[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation，2018，38(3)：162-166.

Optimization Decision Model for Coal Dust Inhibitors Based on Pull-up Method Coupling TOPSIS Method

CHEN Yuanjiang，YUAN Hong

（*School of Resources and Safety Engineering，Central South University，Changsha，Hu'nan* 410083，*China*）

Abstract：[Objective] To establish optimization decision model of coal dust inhibitors in order to provide a useful theoretical reference for scientific evaluation and decision of coal dust inhibitor. [Methods] Based on the technique of order preference by similarity to ideal solution (TOPSIS)，seven evaluation indexes were selected，and then weights were confirmed by using the pull-up method to avoid the subjectivity of decision maker. [Results] This model was applied to evaluate 10 research results of coal dust inhibitors in the last ten years. The results showed that the degradation dust suppressant was the best solution，followed by the coal dust inhibitor，while oxidized starch grafted acrylic acid acrylamide dust suppressant was the worst. [Conclusion] The model can effectively evaluate the comprehensive performance of dust suppression scheme by quantitative data，and which is of great importance for scientific decision making.

Keywords：**coal dust inhibitors**；**pull-up method**；**TOPSIS**；**optimization decision model**

中国是世界上产煤和用煤第一大国，在煤炭开采、储存、装卸及运输过程中会产生大量的煤尘，恶化工人劳动环境，同时导致煤炭大量流失，甚至可能引发爆炸，成为安全生产的重大隐患，带来严重的经济损失[1-3]。随着中国环境保护意识的提高及节能减排制度的实施，煤尘粉尘防治在煤炭工业中占有极其重要的地位[4-5]。由于化学抑尘剂抑尘效果好、综合效益高、环境友好，因此化学抑尘的方法为世界各国所广泛采用，在科研和工业运行中被认为是解决开放性尘源扬尘污染的最佳方法[6-7]。虽然目前国内外针对煤尘抑制剂的研究和开发很多，但真正商业化的产品还比较少[8]，为了节约资源，更有效的进行后续的现场试验，进行煤尘抑制剂的优选决策是一项至关重要的工作。

因此，本文拟采用逼近理想解排序法，结合基于差异驱动原理的拉开档次法来确定指标权重系数，构

收稿日期：2017-12-18 **修回日期**：2018-01-03

资助项目：交通部西部科技中心项目“人—路—环境系统和谐度解耦及工程控制研究”(200831878518)

第一作者：陈沅江(1970—)，男(汉族)，湖南省湘潭市人，博士，副教授，主要从事岩土与环境安全工程方面的研究。E-mail：cyj201@csu.cn。

通讯作者：袁红(1993—)，女(汉族)，陕西省渭南市人，硕士研究生，研究方向为环境安全工程。E-mail：308379421@qq.com。

建拉开档次法—TOPSIS 优选决策模型。以近 10 a 煤尘抑制剂的研究成果为例探索了这一方法的合理性。该方法较全面地考虑了影响煤尘抑制剂现场使用的多种因素,避免了单一判据的局限性,并对各种因素的重要性进行对比分析,使评价结果更为科学,以期为抑尘剂优选决策提供理论依据。

1　方 法

拉开档次法是为了从整体上尽可能体现出各被评价对象之间的差异,具有客观、评价过程透明和保序性好等特点。TOPSIS 法是一种逼近理想解的排序方法,通过计算每一个被评价对象与正理想解和负理想解之间的差距,再比较与理想解的接近度,从而对被评价对象进行排序。本文采用两种方法相结合的综合评估方法对煤尘抑制剂进行优选决策,以期获得理想的评价选择效果。

1.1　决策模型指标体系确定

煤尘抑制剂主要应用于抑制扬尘领域,在实际的应用过程中可能经受自然条件的影响,因此需要对试验制得的煤尘抑制剂进行各种性能测试。煤尘抑制剂的综合性能一般通过性质表征和应用性能来体现,而关于需要测试的性质和性能并没有确切的规定和标准。笔者总结了性质表征和应用性能测试的一般内容。性质表征一般包括黏度测试、固含量的测定、红外光谱分析、差热分析和电镜扫描分析等。应用性能一般包括抗压强度、抗风蚀性、耐温性、抗冻性、抗雨淋次数、保水性、渗透性、抗蒸发性等。

本文根据一致性、系统性、可比性、可测性、科学性等指标体系的确定原则,综合分析国内外已有研究成果,结合室内试验和工程应用经验,同时征求行业专家意见,总结归纳出 7 项影响抑尘剂性能的指标。具体指标和含义见表 1。

表 1　煤尘抑制剂优选决策模型指标体系

目标层	准则层	指标层	指标说明
抑尘剂综合性能评价	应用性能	抗压性	在合适的固含量下,沙模的相对最大抗压强度
		抗风蚀性	固结层在相对最大的风速下连续吹风,仍能保存的较完整
		抗冻性	固结层在一定的低温下一段时间后,依然较硬
		耐温性	固结层在一定的高温下一段时间后,依然较硬
		抗雨淋次数	沙模在数次雨淋后,仍能保持较好的稳定性
		保水性	喷洒抑尘剂的沙堆一段时间后的,沙堆的含水率
	性质表征	黏 度	在考虑了放置稳定性、经济性之后,抑尘剂的相对最佳黏度

1.2　拉开档次法[9-10]确定指标权重

(1) 评价指标标准化处理。设有 n 个样本,m 个特征变量,设第 i 个样本的第 j 个变量的观测值为 X_{ij},对其进行标准化处理得到 y_{ij}:

$$y_{ij}=X_{ij}-\overline{X_j}/S_j \quad (1\leqslant i\leqslant n,\ 1\leqslant j\leqslant m) \tag{1}$$

式中:$X_j=\frac{1}{n}\sum_{i-1}^{n}X_{ij}$,$S_j=\sqrt{\frac{1}{n-1}\sum_{i-1}^{n}(X_{ij}-X_j)^2}$

$(1\leqslant i\leqslant n,\ 1\leqslant j\leqslant m)$。

(2) 确定指标权重。权重系数的原则是:尽可能体现各被评价对象之间的差异,使之拉开档次,以利于排序。取极大型评价指标 $Y_1,Y_2,Y_3,\cdots,Y_m$ 的线性函数:

$$T_i=\omega_1Y_1+\omega_2Y_2+,\cdots,\omega_mY_m \tag{2}$$

为系统的综合评价函数。式中,$\omega=(\omega_1,\omega_2,\cdots,\omega_m)$是 m 个指标的权重系数向量。

确定权重系数 ω 就是使(3) 式取最大值。

$$C=\omega^TH\omega \tag{3}$$

式中:$\boldsymbol{H}=A^TA$,为实对称矩阵。此处限定 $\omega^T\omega=1$。权重系数为矩阵 $\boldsymbol{H}$ 的最大特征值所对应的特征向量。

(3) 使用 python 对其编程。对样本数据进行标准化处理:x_scale =preprocessing. scale(x,axis=0)

求矩阵 $\boldsymbol{H}$:$\boldsymbol{H}$=np. dot(np. transpose(x_scale),x_scale)

求矩阵 $\boldsymbol{H}$ 的特征值、特征向量:tzz,tzxl =np. linalg. eig($\boldsymbol{H}$)

确定指标权重:w=np. array(tzxl[:,0])

1.3　TOPSISI[11-12]法进行抑尘剂优选决策模型的构建

(1) 构造加权规范化矩阵。将归一化处理后的矩阵 Z 的列向量与“拉开档次法”确定的指标层层次总排序权重 相乘,可得加权规范化决策矩阵 $\boldsymbol{V}$ 为

$$\boldsymbol{V}=(\boldsymbol{V}_{ij})_{n\times m}=\omega Z \tag{4}$$

(2) 确定正理想解和负理想解。由于之前将抑尘剂的性能指标都转换为极大型指标,因此正理想解为每列中的最大值,负理想解为每列中的最小值。

(3) 计算距离。计算被评价对象到正理想解和负理想解的欧式距离。

$$D_i^+=\sqrt{\sum_{j=1}^{m}(V_{ij\max}-V_{ij})^2},$$

$$D_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^{m}(V_{ij\min} - V_{ij})^2} \quad (5)$$

(4) 计算各个方案与最优方案的相对接近度 L_i。

$$L_i = \frac{D_i^-}{D_i^+ + D_i^-} \quad (i=1,2,\cdots,m;\ 0 \leqslant L_i \leqslant 1) \quad (6)$$

(5) 比较各个方案的优劣。把实际可行方案与正理想解和负理想解做比较,若某个可行方案最靠近正理想解,同时又远离负理想解,则此方案是方案集的满意解。即根据 L_i 的大小对各方案进行排序。越接近 1,表示该方案越接近评价最优水平。

(6) 使用 python 对其编程。对样本数据进行归一化处理,并与权重 ω_m 相乘,得到加权规范化决策矩阵 $\boldsymbol{V}$:

```
for i in range(M):
  for j in range(N):
  x1[0][j]+=(x[i][j]) * *2
  x[i][j]/=np.sqrt(x1[0][j])
  v[i][j]=x[i][j] * w[j]
```

确定各列数据的正负理想解 v_max,v_min,并据此计算被评价对象到正理想解和负理想解的欧式距离 D_i^+,D_i^-:

```
Dz[i][0] +=(v_max[0][j] -v[i][j]) * *2
Df[i][0] +=(v_min[0][j] -v[i][j]) * *2
```

根据求解出的各抑尘剂到正负理想解的欧氏距离 D_i^+,D_i^-,计算出其相对接近度 L_i 的值:

```
for i in range(M):
li[i][0] +=Df[i][0] /(Df[i][0] +Dz[i][0])
```

1.4 煤尘抑制剂优选决策模型流程

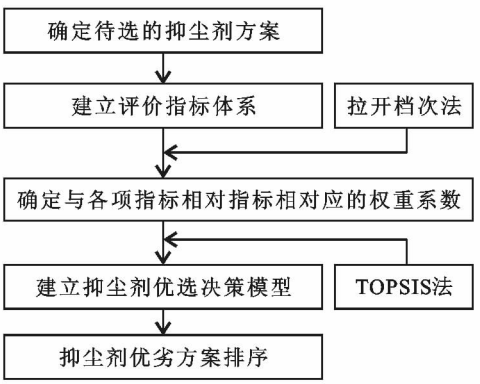


图 1 煤尘抑制剂优选决策模型流程

2 材料与结果分析

2.1 数据收集

本文笔者收集了 10 余项典型的煤尘抑制剂研究成果,经过分析整理,得到数据样本如表 2 所示。

表 2 煤尘抑制剂性能原始数据

抑尘剂名称	抗压性/MPa	抗风蚀性(抗风速)/(m·s^{-1})	抗冻性/℃	耐温性/℃	抗雨淋次数/次	保水性/%	黏性/(MPa·s^{-1})
新型运输用煤炭抑尘剂[13]	0.098	14.0～15.0	−12	50	3	—	—
甘蔗渣抑尘剂[14]	0.025 99	8.0	−15	50	—	4.0	23 950.0
氧化淀粉接枝丙烯酸丙烯酰胺抑尘剂[15]	1.24	5.5～7.9	—	100	4	7.0	212.6
煤尘抑制剂[16]	2.00	14.0～15.0	−15	50	6	—	30.0
三元共聚固沙抑尘剂[17]	—	8.0～10.7	−18	210	5	4.0～10.0	—
降解型抑尘剂[18]	3～5	13.9～20.7	−20	50	5	—	600.0
煤尘抑尘剂[19]	5.46	8.0～10.7	−40	40	—	21.50	7.0
固尘抑尘剂[20]	5.02	8.0～10.7	−18	40	—	18.97	164.0
微波辐射下氧化淀粉-AA-AM 抑尘剂[21]	0.59	14.0～15.0	−12	190	3	7.60	830.0
淀粉-AA-PVA 抑尘剂[21]	0.67	14.0～15.0	−12	170	3	4.80	1 310.0

2.2 数据预处理

由于目前煤尘抑制剂研究分散,在学者之间没有一套通用完善的评价体系进行性能衡量,造成了抑尘剂性能测试不一,无法评判其具体的抑尘效果。在表 2 收集的近 10 a 抑尘剂研究成果中,存在大量缺失数据的现象。同时,不同指标之间数据量级不同,在综合评价中无法直接使用,故对其进行预处理,方便后续决策模型对各方案进行计算。数据预处理结果为表 3。

(1) 区间数据、大于数据和跨度大数据的处理。对收集到的数据进行分析,其中各方案的含水率、抗风蚀性指标的数据大多在一个较小区间内取值,且波动范围不大,为了方便计算,取其均值处理。抑尘剂的黏性、抗压能力数据跨度范围比较大,为了不影响判定结果的准确性,避免单个大数据对整体分析评价模型造成影响,对数据进行约束处理,去掉该指标下数据值的最大值、最小值后求均值 a,当数据值大于 a 时,则用 a 替换,数据值小于等于 a 时,则取原始数值

不变。其中 a 的计算公式如下:

$$a=(\sum_{i=1}^{n}X_{ij}-x_{j\max}-X_{j\min})/(n-2) \tag{7}$$

式中:$\sum_{i=1}^{n}X_{ij}$,$X_{j\max}$,$X_{j\min}$——第 j 列数据值求和,最大值,最小值。

(2) 评价指标的极性处理。在对各抑尘剂进行综合评价之前,必须对评价指标的类型进行极性处理,使其具有相同的极性,便于决策的进行。本文指标采用极大性指标,即指标越大越好。对于极小性指标,如抑尘剂的抗冻性,通过 $X_{ij}'=-X_{ij}$ 变换而将转换成极大型指标。

(3) 耐温数据处理。自然条件有春夏秋冬,夏季高温,在柏油路且机动车较多的路段,中午的瞬时路面温度可能达到 60 ℃,而在寒冷的冬天,气温有可能达到−40 ℃。不同季节的温度差异就对抑尘剂的抗冻和耐高温性能提出了严峻的考验。因此,抑尘剂的抗温耐冻性值在−40～60 ℃范围内就可以满足实际应用要求,过高或过低的耐温性没有实际意义。因此,当方案的耐温性指标数据值高于 60 ℃时,统一取 60 ℃代替。

(4) 数据完善。由于所收集的数据不完整,采用均值插补法替代缺失值。

$$X_{ij}=\frac{X_{1j}+\cdots+X_{ij}+\cdots+X_{nj}}{K}$$
$$(1\leqslant i\leqslant n,\ 1\leqslant j\leqslant m) \tag{8}$$

式中:K——某一指标下的非零个数。

表 3　煤尘抑制剂性能数据预处理

抑尘剂名称	抗压性/MPa	抗风蚀性(抗风速)/(m·s^{-1})	抗冻性/℃	耐温性/℃	抗雨淋次数/次	保水性/%	黏性/(MPa·s^{-1})
新型运输用煤炭抑尘剂	0.098 0	14.50	12	50	3	10.12	313.92
甘蔗渣抑尘剂	0.026 0	8.00	15	50	4	4.00	524.43
氧化淀粉接枝丙烯酸丙烯酰胺抑尘剂	1.240 0	6.70	18	60	4	7.00	212.60
煤尘抑制剂	1.945 4	14.50	15	50	6	10.12	30.00
三元共聚固沙抑尘剂	1.156 2	9.35	18	60	5	7.00	313.92
降解型抑尘剂	1.945 4	17.30	20	50	5	10.12	524.43
煤尘抑尘剂	1.945 4	9.35	40	40	4	21.50	7.00
固尘抑尘剂	1.945 4	9.35	18	40	4	18.97	164.00
微波辐射下氧化淀粉-AA-AM 抑尘剂	0.590 0	14.50	12	60	3	7.60	524.43
淀粉-AA-PVA 抑尘剂	0.670 0	14.50	12	60	3	4.80	524.43

2.3　优选决策

(1) 指标权重的计算。由于 7 个衡量指标对抑尘剂效果的影响不同,且不同指标的数据值各有差异,权重分配是否科学合理,对煤尘抑制剂成果的评价结果有直接的影响,因此,采用拉开档次法对各指标计算权重:

$$\omega=0.165\ 2\quad 0.055\ 0\quad 0.165\ 4\quad 0.160\ 4\quad 0.101\ 9\quad 0.182\ 2\quad 0.169\ 9$$

(2) 规范化矩阵 $\boldsymbol{V}$。根据式(4)得出各方案的各项指标的相应数值大小如下:

$$\boldsymbol{V}=\begin{pmatrix}
0.136\ 8 & 6.781\ 1 & 1.527\ 0 & 1.168\ 6 & 1.875\ 9 & 2.191\ 4 & 1.578\ 2\\
0.036\ 3 & 3.741\ 3 & 1.527\ 0 & 1.460\ 8 & 1.875\ 9 & 3.026\ 3 & 2.636\ 6\\
1.730\ 7 & 3.133\ 3 & 1.055\ 8 & 1.753\ 0 & 2.251\ 1 & 2.921\ 9 & 1.066\ 8\\
2.715\ 3 & 6.781\ 1 & 1.527\ 0 & 1.460\ 8 & 1.875\ 9 & 4.382\ 9 & 0.150\ 8\\
1.613\ 7 & 4.372\ 6 & 1.055\ 8 & 1.753\ 0 & 2.151\ 1 & 3.652\ 4 & 1.578\ 2\\
2.715\ 3 & 8.090\ 6 & 1.527\ 0 & 1.947\ 7 & 1.875\ 9 & 3.652\ 4 & 2.636\ 6\\
2.715\ 3 & 4.372\ 6 & 3.242\ 7 & 3.895\ 5 & 1.500\ 7 & 3.026\ 3 & 0.035\ 2\\
2.715\ 3 & 4.732\ 6 & 2.861\ 2 & 1.753\ 0 & 1.500\ 7 & 3.026\ 3 & 0.824\ 5\\
0.823\ 5 & 6.871\ 1 & 1.146\ 3 & 1.168\ 6 & 2.251\ 1 & 2.191\ 4 & 2.636\ 6\\
0.935\ 1 & 6.871\ 1 & 0.724\ 0 & 1.168\ 6 & 2.251\ 1 & 2.191\ 4 & 2.636\ 6
\end{pmatrix}$$

(3) 正理想解和负理想解。正理想解是所有参与评价的抑尘剂方案在该项指标的最高得分组合,也就是这组抑尘剂中最理想的性能指标取值;负理想解是在该项指标的最低得分组合。

正理想解:$V^{+}=(2.715\ 3\quad 8.090\ 6\quad 3.242\ 7\quad 3.895\ 5\quad 2.251\ 1\quad 4.382\ 9\quad 2.636\ 6)$

负理想解:$V^{-}=(0.036\ 3\quad 3.133\ 3\quad 0.724\ 0\quad 1.168\ 6\quad 1.500\ 7\quad 2.191\ 4\quad 0.035\ 2)$

(4) 各个抑尘剂的欧式距离和优劣排序。由公式(5),(6)求各抑尘剂的欧氏距离和相对接近度 L_i,依据其相对接近度的大小对各抑尘剂进行排序如表4所示。

表4 各个抑尘剂的欧氏距离及其优劣排序

抑尘剂名称	D^+	D^-	L_i	名次
新型运输用煤炭抑尘剂	4.980 6	6.235 4	0.55	6
甘蔗渣抑尘剂	6.400 7	4.400 8	0.40	9
氧化淀粉接枝丙烯酸丙烯酰胺抑尘剂	6.285 6	3.810 7	0.37	10
煤尘抑制剂	4.111 7	7.340 9	0.64	2
三元共聚固沙抑尘剂	5.105 2	5.061 2	0.49	8
降解型抑尘剂	2.722 5	8.589 2	0.75	1
煤尘抑尘剂	4.795 1	6.185 4	0.56	5
固尘抑尘剂	4.924 0	5.403 4	0.52	7
微波辐射下氧化淀粉-AA-AM抑尘剂	4.682 6	6.642 0	0.58	3
淀粉-AA-PVA抑尘剂	4.844 2	6.635 1	0.57	4

由表4可知:综合考虑黏性、抗压性、抗风蚀性、抗冻耐温性、抗雨淋性、含水率7个决策指标,利用拉开档次法—TOPSIS模型求解的10种抑尘剂方案综合排名可知,各种抑尘剂的综合性能水平参差不齐,优劣差距较大,其中以降解型抑尘剂、煤尘抑制剂等为主排名相对靠前,而以甘蔗渣抑尘剂、氧化淀粉接枝丙烯酸丙烯酰胺抑尘剂等为代表的其他几种抑尘剂排名靠后,其综合性能明显较其他差。降解型抑尘剂是距离正理想解最接近,同时距离负理想解最远的抑尘剂,其综合性能最佳,在抗压性、抗风蚀性、黏性、抗雨淋性均处于领先地位,优于其他方案,在进行此抑尘剂的改进时,可以考虑改进其抗冻耐温型。降解型抑尘剂由于各个性能较优,因此其适应环境的能力也相对较高,实用性好,易于推广使用。由于此种抑尘剂未测试其含水率,因此,其评价结果可能存在一定的偏差。在进行抑尘剂的研究时,可以参考评价结果,进行更有效的试验和优化,以不断提高煤尘抑制剂的抑尘效果。

3 结论

(1) 提出了一种基于拉开档次法—TOPSIS的煤尘抑制剂优选决策模型,确定了7项评价指标:黏性、抗压性、抗风蚀性、耐温性、抗冻性、抗雨淋次数、保水性。采用拉开档次法确定了指标权重,避免了人为赋予权重主观性和片面性的影响。

(2) 该模型通过定量的数据直观地反应出方案的综合性能优劣,可避免因经验不足造成的设计方案缺陷,帮助人们快速做出较为科学的决策,具有一定的现实意义。应用该模型对近10 a煤尘抑制剂的部分研究成果进行优选,计算得出每个方案与最优方案的距离分别为0.55,0.40,0.37,0.64,0.49,0.75,0.56,0.52,0.58,0.57。可知降解型抑尘剂为相对最优方案。

(3) 使用该模型来进行抑尘剂优选是一种新的尝试,本文只是提出方法和思路,有一些具体问题尚待继续探索。该模型的评判结果只是可选方案中的一个相对最优方案,而不是绝对最优。

[参 考 文 献]

[1] 杨静,刘丹丹,祝秀林,等.化学抑尘剂的研究进展[J].化学通报,2015,76(4):346-353.

[2] Radim J, Blank B, Mirosl A V D, et al. Health impact of air pollution to children[J]. International Journal of Hygiene and Environmental Health, 2013,216(5):533-540.

[3] Yang Jing, Wu Xiukun, Li Gaiping. Studies of surface characteristics and wetting mechanism of respirable coal dust[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2010,20(3):365-371.

[4] 梁文静,任思达,马贺,等.环境友好型煤尘抑制剂的制备[J].环境工程学报,2017,9(11):5091-5096.

[5] 林木松,马磊,李宇春,等.环保型煤流抑尘剂的研制及工业试验研究[J].中国电力,2017,50(8):168-172.

[6] Gay F T, Cowsette D D, Champa J T, et al. Method of dusting coal mine surfaces[P]. United States Patent, 6726849,2004-04-27.

[7] Pullen E M, Pullen M D, Pullen D. Fluid formulation and method for dust control and wetting enhancement [P]. United States Patent, 6124366,2000-09-26.

[8] 徐海栋,张雷波,尹立峰,等.化学抑尘剂的研究现状及进展评价[J].天津科技,2015,42(6):10-13.

[9] 郭亚军.多属性综合评价[M].沈阳:东北大学出版社,1996:50-54.

[10] 贺义,陈勇,黄炳林,等.基于拉开档次法的矿山开采程序综合评价[J].有色金属,2009,61(3):9-11.

(下转第173页)

[7] 宋宪青.不同施肥量及栽培密度对水稻产量和效益的影响[J].现代农业科技,2011(2):52-52.
[8] 逯非,王效科,韩冰,等.中国农田施用化学氮肥的固碳潜力及其有效性评价[J].应用生态学报,2008,19(10):2239-2250.
[9] 高春雨.县域农田 N_2O 排放量估算及其减排碳贸易案例研究[D].北京:中国农业科学院,2011.
[10] 邱建军,王立刚,李虎,等.农田土壤有机碳含量对作物产量影响的模拟研究[J].中国农业科学,2009,42(1):154-161.
[11] 高懋芳.小清河流域农业面源氮素污染模拟研究[D].北京:中国农业科学院,2011.
[12] 何瑞银,罗汉亚,李玉同,等.水稻不同种植方式的比较试验与评价[J].农业工程学报,2008,24(1):167-171.
[13] 王巧环,任玉芬,孟龄,等.元素分析仪同时测定土壤中全氮和有机碳[J].分析试验室,2013,32(10):41-45.
[14] Li Changsheng. Modeling nitrate leaching with a biogeochemical model modified based on observations in a row-crop field in Iowa[J]. Ecological Modelling, 2006, 196(1/2):116-130.
[15] 喻朝庆,李长生,张峰,等.大尺度农业因旱减产动态预报及不同空间尺度的灾情重现期变化评估:以辽宁省为例[C].北京:中国气象学会年会,2014:1-17.
[16] Guo Miao. The environmental profile of bioethanol produced from current and potential future poplar feedstocks in the EU. [J]. Green Chemistry, 2014, 16(11):4680-4695.
[17] 陈海心,孙本华,冯浩,等.应用 DNDC 模型模拟关中地区农田长期施肥条件下土壤碳含量及作物产量[J].农业环境科学学报,2014,33(9):1782-1790.
[18] Vidaliglesias F J, Sollagullón J, Rodes A, et al. Understanding the nernst equation and other electrochemical concepts: An easy experimental approach for students[J]. Journal of Chemical Education, 2012, 89(7):936-939.
[19] English Brian P, Min Wei, van Oijen Antoine M, et al. Ever-fluctuating single enzyme molecules: Michaelis-Menten equation revisited [J]. Nature Chemical Biology, 2006, 2(2):87-94.
[20] Church J A, Clark P, Cazenave A, et al. Climate change 2013: The physical science basis contribution of working group Ⅰ to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change[J]. Computational Geometry, 2013, 18(2):95-123.
[21] Weiske, A. Mitigation of greenhouse gas emissions in European conventional and organic dairy farming[J]. Agriculture Ecosystems & Environment, 2006, 112(2/3):221-232.
[22] 徐艳玲.氮肥对水稻生长的影响[J].现代农业科技,2014(19):27-27.
[23] 夏文建,周卫,梁国庆,等.稻麦轮作农田氮素循环的 DNDC 模型分析[J].植物营养与肥料学报,2012,18(1):77-88.
[24] 李虎,王立刚,邱建军.基于 DNDC 模型的华北典型农田氮素损失分析及综合调控途径[J].中国生态农业学报,2012,20(4):414-421.
[25] 中华人民共和国农业部.种养结合循环农业示范工程建设规划(2017-2020)[EB/OL].(2017-08-15).http://www.moa.gov.cn/zwllm/ghjh/201708/t20170815_5785251.htm.

(上接第 166 页)

[11] 景国勋,施式亮.系统安全评价与预测[M].徐州:中国矿业大学出版社,2009.
[12] Opricovic S, Gwo-Hshiung T. Cornpromise solution by MCDM methods:A comparative analysis of VIKOR and TOPSIS [J]. European Journal of Operational Research, 2004,156(2):445-455.
[13] 来水利,柴强,王宾.新型运输用煤炭抑尘剂的制备与性能[J].精细石油化工,2012,29(1)56-59.
[14] 王永慧,贾志超,蒋林天.甘蔗渣抑尘剂的微波聚合制备及性能表征[J].环境工程学报,2017,11(7):4202-4209.
[15] 韩明迪.氧化淀粉接枝丙烯酸丙烯酰胺抑尘剂的合成与应用研究[D].北京:北京化工大学,2009.
[16] 霍磊霞,煤尘抑制剂的制备与性能研究[D].太原:山西大学,2009.
[17] 梁新景. VAC-MMA-BA 三元共聚物固沙抑尘剂的合成与应用研究[D].北京:北京化工大学,2010.
[18] 尹静.降解型抑尘剂的研究[D].天津:天津理工大学,2013.
[19] 王新会.煤尘抑尘剂的研究[D]. 呼和浩特:内蒙古工业大学,2010.
[20] 曹晓锋.固尘抑尘剂的研制[D].呼和浩特:内蒙古工业大学,2009.
[21] 柴强.微波辐射下丙烯酸类和抑尘剂的合成及应用研究[D].西安:陕西科技大学,2012.