

# 生物质直燃发电厂仓库规模动态规划

张钦<sup>1,2</sup>, 常春阳<sup>1,2</sup>

(南京航空航天大学1.经济与管理学院; 2.能源软科学研究中心, 江苏南京211106)

摘要：生物质直燃发电厂仓库以及收储站的规模大小与库存水平，对于降低电厂的固定成本和运营成本至关重要。为解决这些问题，建立了电厂仓库、收储站规模与其库存控制联合动态规划优化模型。以30MW生物质电厂为例，根据模型及其相关参数的敏感性分析，得到了一些结论，比如，在使用多种生物质燃料情形下，电厂仓库、收储站的最优规模分别为35887m<sup>2</sup>、24147m<sup>2</sup>；当收储站和电厂的安全库存分别在6000t以下和17000t以下时，总费用会有降低，否则会相反。使用单一生物质燃料有类似的结论。

为了解决原料供应的间断性与生产的连续性问题，生物质发电厂(以下简称为“电厂”)需要持有大量库存才能不中断生产。一个25MW电厂，若想保持正常运转，每年需要约20万t的农林残留物作为原料。

一般情况下，电厂占地面积为66666 ~ 133333m<sup>2</sup>，库容从5000t到30000t不等。某25Mw的电厂内存储量5000t，可维持10d的用量，每天需采购700—800t燃料。规模为2 × 50Mw的湛江生物质直燃发电项目，每天用料3000 ~ 4000t；规模为2 × 12MW的山东京能生物质发电项目，其料场总库存约2万t，每天用料500t。江苏国信如东电厂(25MW)存储15000t燃料，可维持22d的生产。国能射阳生物质发电厂(25MW)的仓库容量有8000t。

由于原料供应的分散性，发电厂还需在周边数十公里范围内建立4 ~ 12个秸秆收储站，每个收储站占地10000 ~ 40000m<sup>2</sup>(15—60亩)。凯迪宿迁电厂(2 × 12Mw)有12个收储站，每个站点每月可提供1000 ~ 2000t原料给电厂，可满足总需求量的60%。山东单县发电厂在全县建立了8个秸秆收储站。江苏国信电厂在县辖乡镇设有4个收储站，平均占地面积约为26667m<sup>2</sup>。国能射阳电厂有10个收储站，总贮存能力为5 ~ 6万t。

从整体看，我国生物质发电项目的原料库容相差较大，即使有相同的装机规模也存在这个问题。电厂仓库投资成本主要是在土地征用费用上，占地面积越大费用越高。过大的库容会造成浪费，而过小的库容也会使得原料无处可放。昌图电厂的料场面积在项目投产后就扩增了33333m<sup>2</sup>，国信如东电厂也增加料场占地面积近20000m<sup>2</sup>。

尽管已有若干文献涉及了生物质能源供应链，但只有很少的学者研究了库存问题。由于供需双方的随机性、生物质网络的独特的特点，该类成果将有很好的理论和实际价值。Rentizelas等考虑了存储方法，即封闭的通过热空气喷射干燥生物质的仓库(WD方案)、有屋顶没有干燥能力的棚架仓库(CND方案)，以及用塑料薄膜覆盖的野外存储(AS方案)，指出储存和加工成本占物流总成本的50 ~ 60%，并认为多生物质方法可以降低储存空间。Zhu等分析了生物质能精炼厂配套的物流系统问题，建立一个混合整数规划模型，该模型包含了确定仓库和生物炼制厂的数量，位置和规模，规定的收获方式，以及确定运输方式、能力、车队。

综上所述，结合现有研究成果和实际问题，考虑原料季节性供应和发电厂生产需求的特点，建立动态规划模型，对电厂和收储站的仓库规模、库存进行联合优化，实现季节性供应的秸秆在收储站与电厂之间的调度。

## 1符号及含义

为方便起见，本文所用的符号及其含义汇总如下。

$\alpha_{ij}$  为仓库  $i$  中燃料  $j$  所用仓库巷道占用比例(%)；  
 $\beta_{ij}$  为仓库  $i$  中燃料  $j$  所用仓库库容利用比例(%)；  
 $v_j$  为燃料  $j$  的单位质量体积( $\text{m}^3/\text{kg}$ )；  
 $a_{ch}$  为所有收储站在旺季时的总供应量；  
 $a_{ci}$  为所有收储站在淡季时的总供应量；  
 $a_{ik}$  为收储站  $i$  在第  $k$  阶段的最大收购量( $\text{t/d}$ )；  
 $b_k$  为电厂在第  $k$  阶段外购燃料时的市场最大供应量( $\text{t/d}$ )；  
 $b_l$  为淡季时电厂外购的燃料量( $\text{t/d}$ )；  
 $b_h$  为旺季时电厂外购的燃料量( $\text{t/d}$ )；  
 $C_k$  为电厂在第  $k$  阶段的燃料采购的总费用(元)；  
 $C_l$  为电厂的燃料订货费(元)；  
 $CF_{ijk}$  为仓库  $i$  在第  $k$  阶段持有第  $j$  种燃料的固定成本；  
 $CV_{0jk}$  为第  $k$  阶段中燃料  $j$  电厂仓库中的可变成本(元)；  
 $CV_{ijk}$  为第  $k$  阶段中燃料  $j$  在收储站  $i$  仓库中的可变成本(元)；  
 $CO_{0j}$  为电厂中燃料  $j$  所占仓库建成后运营成本(元/kg)；  
 $CO_{ij}$  为收储站  $i$  中燃料  $j$  所占仓库建成后运营成本(元/kg)；  
 $d$  为电厂的燃料日需求量( $\text{t}$ )；  
 $d_k$  为电厂在第  $k$  阶段对燃料的需求量( $\text{t}$ )；  
 $F_{ij}$  为仓库  $i$  中燃料  $j$  所占仓库库容的单位面积固定成本(元/ $\text{m}^2$ )；  
 $h_k(v_k)$  为阶段  $k$  开始时,电厂库存量  $v_k$  所需的储存费用(元)；  
 $h_{ik}(u_{ik})$  为阶段  $k$  结束时,收储站  $i$  的库存量  $u_{ik}$  所需储存费用(元)；  
 $h_j$  为燃料  $j$  的可堆垛高度( $\text{m}$ )；  
 $I$  为电厂的初始库存( $\text{t}$ )；  
 $I'$  为电厂的期末库存量( $\text{t}$ )；  
 $IC_k$  为收储站第  $k$  阶段的平均库存量( $\text{t}$ )；  
 $I_i$  为收储站  $i$  的初始库存量( $\text{t}$ )；  
 $I'_i$  为收储站  $i$  的期末库存量( $\text{t}$ )；  
 $i$  为第  $i$  个收储站( $i=0,1,2,\dots,m,0$  表示电厂)；  
 $j$  为为燃料种类, $j=1,2,3$ (1 代表草秆,2 代表壳类,3 代表林木质)；  
 $k$  为库存控制的第  $k$  个阶段( $k=1,2,\dots,n$ )；  
 $LT_k$  为第  $k$  阶段的订货提前期(月)；  
 $M$  为电厂的最大库容量( $\text{t}$ )；  
 $M_i$  为收储站  $i$  的最大库容( $\text{t}$ )；  
 $OS_k$  为电厂在第  $k$  阶段从市场直接采购的燃料量( $\text{t}$ )；  
 $P$  为燃料的平均价格,包括运费(元/ $\text{t}$ )；  
 $P_{ij}$  为仓库  $i$  中燃料  $j$  所用仓库(包括设备)的造价(元/ $\text{m}^2$ )；  
 $Q_k$  为电厂在第  $k$  阶段的订货量；  
 $SS$  为电厂在整个阶段的安全库存水平( $\text{t}$ )；  
 $SS_i$  为收储站  $i$  在整个阶段的安全库存水平( $\text{t}$ )；  
 $S_{ik}$  为收储站  $i$  在第  $k$  阶段的收购量( $\text{t}$ )；  
 $t_k$  为阶段  $k$  时间长度(月)；  
 $u_{ik}$  为收储站  $i$  在阶段  $k$  开始时的燃料库存量( $\text{t}$ )；  
 $v_k$  为  $k$  阶段开始时电厂的燃料库存量( $\text{t}$ )；  
 $w_i$  为仓库  $i$  中燃料  $j$  所占仓库面积( $\text{m}^2$ )；  
 $x_{ik}$  为收储站  $j$  在阶段  $k$  运往电厂的燃料量( $\text{t}$ )；  
 $y_i$  为仓库  $i$  的折旧年限(年)。

## 2 采购流程

假设某生物质发电厂有 $m$ 个收储站，电厂和收储站的库存管理服从电厂生产。将电厂的生产时间划分为 $n$ 个阶段。在每一个阶段，电厂根据库存的消耗情况决定是否订货，当库存水平达到订货点时，电厂向收储站发出订单，也可直接从市场采购，但在数量上后者只占很少的一部分。收储站的燃料来自农户或经纪人。因为农作物生长的周期性，电厂和收储站都面临燃料供应的淡季和旺季问题。无论何时，它们均需更及时更新和交换库存信息，其采购流程如图1所示。

以收储站与电厂的仓库规模作为自变量，库存费用和仓库运营费用最小为目标，构建一个库存控制与仓库规模联合优化模型。

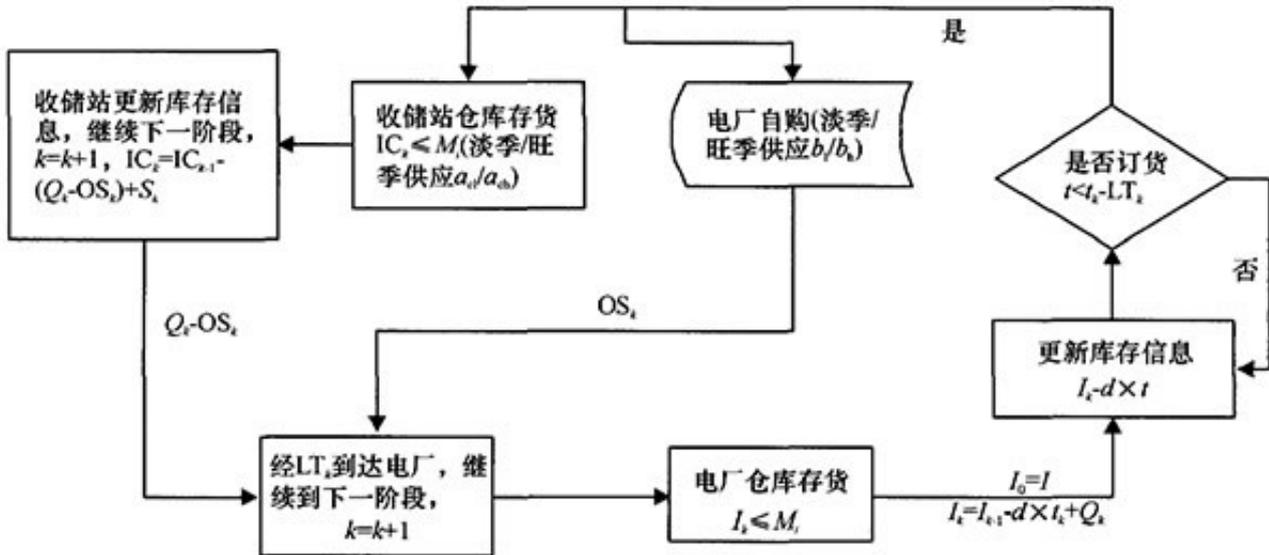


图1 采购流程

Fig.1 Procurement flowchart

## 3 模型构建

设电厂的初始库存为  $I$ , 在第  $k$  阶段对燃料的需求量为  $d_k$ , 自购燃料量  $OS_k$ , 自购量不能超过市场的供应量  $b_k$ , 库存水平不超过最大库容量  $M$ , 也不低于安全库存水平  $SS$ 。

收储站  $i$  在第  $k$  阶段的收购量  $S_{ik}$  不超过市场的可供应量  $a_{ik}$ , 库存水平不超过收储站最大库容  $M_i$ , 不低于收储站的安全库存  $SS_i$ , 且运往电厂燃料量  $x_{ik}$ , 则电厂  $k$  阶段的收购量为

$$OS_k + \sum_{i=1}^m x_{ik} \quad (1)$$

状态转移函数为

$$v_{k+1} = v_k + OS_k + \sum_{i=1}^m x_{ik} - d_k, \quad (2)$$

$$u_{i,k+1} = u_{i,k} + S_{ik} - x_{ik} \quad (3)$$

电厂在第  $k$  阶段订购燃料的总费用  $C_k$ , 包括订货费  $C_1$  以及燃料成本单价  $P$ 。其中,

$$C_k =$$

$$\begin{cases} 0, & \text{当 } OS_k + \sum_{i=1}^m x_{ik} = 0, \\ C_1 + P \times (OS_k + \sum_{i=1}^m x_{ik}), & \text{当 } OS_k + \sum_{i=1}^m x_{ik} = \\ & 1, 2, \dots, M + d_k - v_k; \\ \infty, & \text{当 } OS_k + \sum_{i=1}^m x_{ik} > M + d_k - v_k \circ \end{cases} \quad (4)$$

由于电厂直接外购燃料的量较少且送到电厂可直接送入锅炉燃烧，故不考虑外购燃料的库存成本，另外将收储站的燃料收购价格为电厂的内部成本。因此，电厂在每一阶段的总费用只涉及订货成本、电厂的库存成本和收储站的库存成本。

根据上述，令  $v_k$ 、 $u_{ik}$  为状态变量， $x_{ik}$ 、 $OS_k$ 、 $S_{ik}$  为决策变量，建立库存部分的数学模型。

$$\min \quad TC_h = \sum_{k=1}^n \left[ C_k + h_k(v_k) + \sum_{i=1}^m h_{ik}(u_{ik}) \right] \circ \quad (5)$$

$$\text{s. t.} \quad \left\{ \begin{array}{l} v_1 = I, v_{n+1} = I'; \\ u_{i,1} = I_i, u_{i,n+1} = I'_i; \\ SS < v_{k+1} = I + \sum_{j=1}^k (OS_j + \sum_{i=1}^m x_{ij} - d_j) \leq M, \\ k = 1, 2, \dots, n; \\ SS_i \leq u_{i,k+1} = I_i + \sum_{j=1}^k (S_{ij} + x_{ij}) \leq M_i, \\ k = 1, 2, \dots, n; i = 1, 2, \dots, m; \\ 0 \leq S_{ik} \leq a_{ik}, 0 \leq OS_k \leq b_k \circ \end{array} \right. \quad (6)$$

式(5)表示1~n阶段电厂和收储站库存的最小费用。

根据动态规划，得到逆推关系式：

$$\begin{cases} f_k(v_k, u_{ik}) = \min \\ [C_k + h_k(v_k) + \sum_{i=1}^m h_{ik}(u_{ik}) + f_{k+1}(v_{k+1}, u_{i,k+1})], \\ k = n-1, n-2, \dots, 1; \\ f_n(v_n, u_{in}) = C_n + h_n(v_n) + \sum_{i=1}^m h_{in}(u_{in}). \end{cases} \quad (7)$$

允许决策集合为

$$D_k(v_{k+1}, u_{i,k+1}) = \{SS \leq v_{k+1} \leq M, SS_i \leq u_{i,k+1} \leq M_i\}. \quad (8)$$

对于仓库规模部分,最大库容量所对应的仓库规模为

$$w_i = M_i \times \frac{v_j}{h_j} \times \frac{1}{1 - \alpha_{ij}} \times \frac{1}{\beta_{ij}} = \frac{M_i v_j}{(1 - \alpha_{ij}) \beta_{ij} h_j}. \quad (9)$$

因为涉及到设施、设备的折旧计算,为方便起见,设文中的各阶段是相等的,并以月为单位,则仓库*i*在第*k*阶段持有第*j*种燃料的固定成本为

$$CF_{ijk} = \frac{w_i}{12} (F_{ij} + \frac{P_{ij}}{y_i}). \quad (10)$$

关于燃料*j*,电厂和收储站*i*在第*k*阶段的可变成本分别为

$$CV_{0jk} = CO_{0j} \times \frac{v_k + v_{k+1}}{2}, \quad (11)$$

$$CV_{ijk} = CO_{ij} \times \frac{u_k + u_{k+1}}{2}. \quad (12)$$

仓库运营总成本

$$C_{TS_j} = \sum_{k=1}^n [CF_{0jk} + CV_{0jk} + \sum_{i=1}^m (CF_{ijk} + CV_{ijk})]. \quad (13)$$

将库存控制与仓库规模联合优化,构成如下模型

$$\begin{aligned} \min TC &= TC_h + C_{TS_j} = \\ &\sum_{k=1}^n [C_k + h_k(v_k) + \sum_{i=1}^m h_{ik}(u_{ik}) + CF_{0jk} + CV_{0jk} + \\ &\sum_{i=1}^m (CF_{ijk} + CV_{ijk})]. \end{aligned} \quad (14)$$

其中,电厂  $x_{ik}$ 、 $OS_k$ 、 $S_{ik}$ 、 $w_i$  为决策变量。

## 4应用实例

### 4.1基本数据

我国已建的单个生物质项目的组装机容量，除了极个别的为50MW之外，其余基本上均不超过30MW。不失一般性，本文以一个30MW电厂为例来应用上述模型，以下数据来自调研和计算。

假设该电厂每月2d大停机，每年有25d时间大修，每天运行24h，年运行时数约7500h $((365-12 \times 2-25) \times 24=7584)$ ，电厂可采购到的农作物秸秆、农作物壳类和林木残留物的比例约为20：5：75。根据文献[15—16]，可算出该电厂对干燥秸秆的年需求量为232333.07t。如果考虑燃料含水、运输损耗等因素，设损耗率为15.45%，则电厂每年至少采购269494.74t燃料。那么，发电厂对草秆类、壳类和林木需求速率分别为172.48、43.12和646.79t/d。

对于电厂安全库存水平，若按每月28d用量25871.50t计算，即：农作物为5174.30t，壳类秸秆为1293.57t，林木类为19403.02t。各收购站中三类燃料的存储比例也保持20：5：75。

稻草、麦草的到厂价格为260元/t，稻壳400元/t，树枝、树皮260元/t。电厂或收储站承担自己收购燃料的质检、称重、破碎、打捆和装卸等工作。

农作物秸秆捆扎容重为192kg/m<sup>3</sup>，稻壳的自然堆积密度为112—144kg/m<sup>3</sup>；花生壳、木屑、木板、树枝压实打包后的容重781.25kg/m<sup>3</sup>。木材下脚料散堆在露天料场，堆积密度为0.3—0.5t/m<sup>3</sup>，平均堆高取3m，其余物料堆高设为7m。

电厂仓库占地面积中的40%为巷道、42%被利用、18%备用，露天料场造价28元/m<sup>2</sup>，棚库造价64元/m<sup>2</sup>，草秆、壳类、林木的单位库存成本分别为每月27.11、24.76和24.35元/t。收储站造价19.5元/m<sup>2</sup>，固定成本3.54元/m<sup>2</sup>，同样3类燃料的月库存成本分别是19.86、18.29、18.10元/t。这些设施的折旧年限为20年。

抓斗起重机平均13min可以卸载燃料8t，加上检测与称重时间6min，如有2组卸载机械及工人倒班作业，每天工作24h，则进料速度最高可达1152t/d。

假设有5个收购站分别距电厂10km、25km、40km、55km、70km，由文献[6]方法，得到运费分别为14.28、21.54、28.80、36.06和43.32元/t。

电厂和收储站每天收购量，旺季1340t、淡季530t，另外还有电厂在旺、淡季节自行收购的分别为100和50t。电厂向收储站发出订货的费用，每个收购站每次为10元。

### 4.2计算结果

根据经验，一般情况下，收储站存储并满足电厂订单的7d用量，电厂储存20d的秸秆用量，将5月1日到第二年4月31日作为运行周期，收储站和发电厂的安全库存分别为5000t、10000t，由以上公式计算得到表1所示的结果。

表 1 电厂规模、库存成本、仓库运营成本结果

Tab.1 The result of plant size, inventory costs and warehouse operation cost

核算项目	多种生物质混烧时	只使用农作物秸秆	只使用壳类	只使用林木质
电厂仓库规模/m <sup>2</sup>	35 887	51 207	72 673	29 760
收储站规模/m <sup>2</sup>	34 480	49 360	48 313	41 420
电厂订货费/元	69 146 522.11	72 888 556.56	99 837 350.25	66 229 420.59
电厂库存成本/元	3 409 284.54	3 908 961.19	5 980 513.56	4 051 588.80
收储站库存成本/元	3 040 731.21	3 436 096.34	3 554 874.07	2 120 132.30
库存总费用/元	75 596 537.85	80 233 614.09	109 372 737.88	72 401 141.69
电厂仓库运营成本/元	4 912 621.43	5 830 278.60	6 141 896.93	5 885 865.75
收储站仓库运营成本/元	4 770 861.21	5 578 548.11	3 819 655.65	3 491 564.10
仓库总运营成本/元	9 683 482.64	11 408 826.71	9 961 552.58	9 377 429.85
总费用/元	85 280 020.49	91 642 440.79	119 334 290.46	81 778 571.54

#### 4.3敏感性分析

由于可用来敏感性分析的参数比较多，只考虑以下4种情况。如没有特别说明，其参数的输入数据与上述相同。

电厂掺烧生物质时SSi的敏感性分析。当SSi<6000t，则电厂与收储站仓库规模保持不变，总成本随最低库存水平的降低而降低；当6000 SSi 6500时，电厂仓库规模增加了102.53%，收储站规模增加了40.12%；当SSi>6500时，仓库规模不变，总成本有所增高(见图2)。

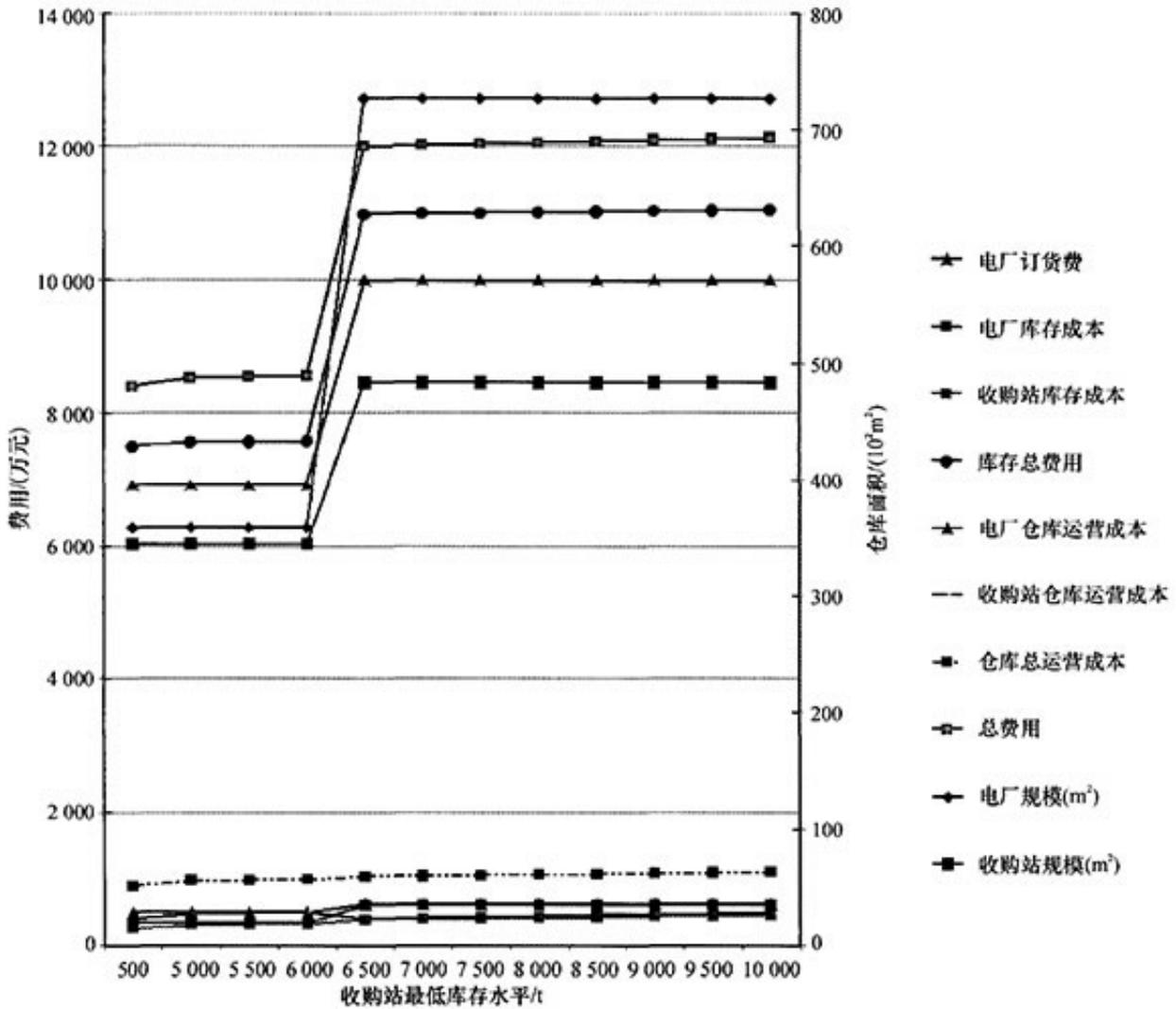


图2 收储站安全库存的敏感性分析结果

Fig.2 Collection station safety inventory level sensitivity results

电厂掺烧生物质时SS的敏感性分析。当SS > 17000时，电厂规模不变，收储站规模递减；SS在17000 SS 22000时，电厂和收储站国模分别维持原有规模35887、24147m²；当22000 < SS 25000时，电厂规模递增，收储站规模递减；当25000 < SS 30000时，电厂规模递增，收储站规模不变。无论哪种情形，SS增加总费用也随之增加（见图3）。

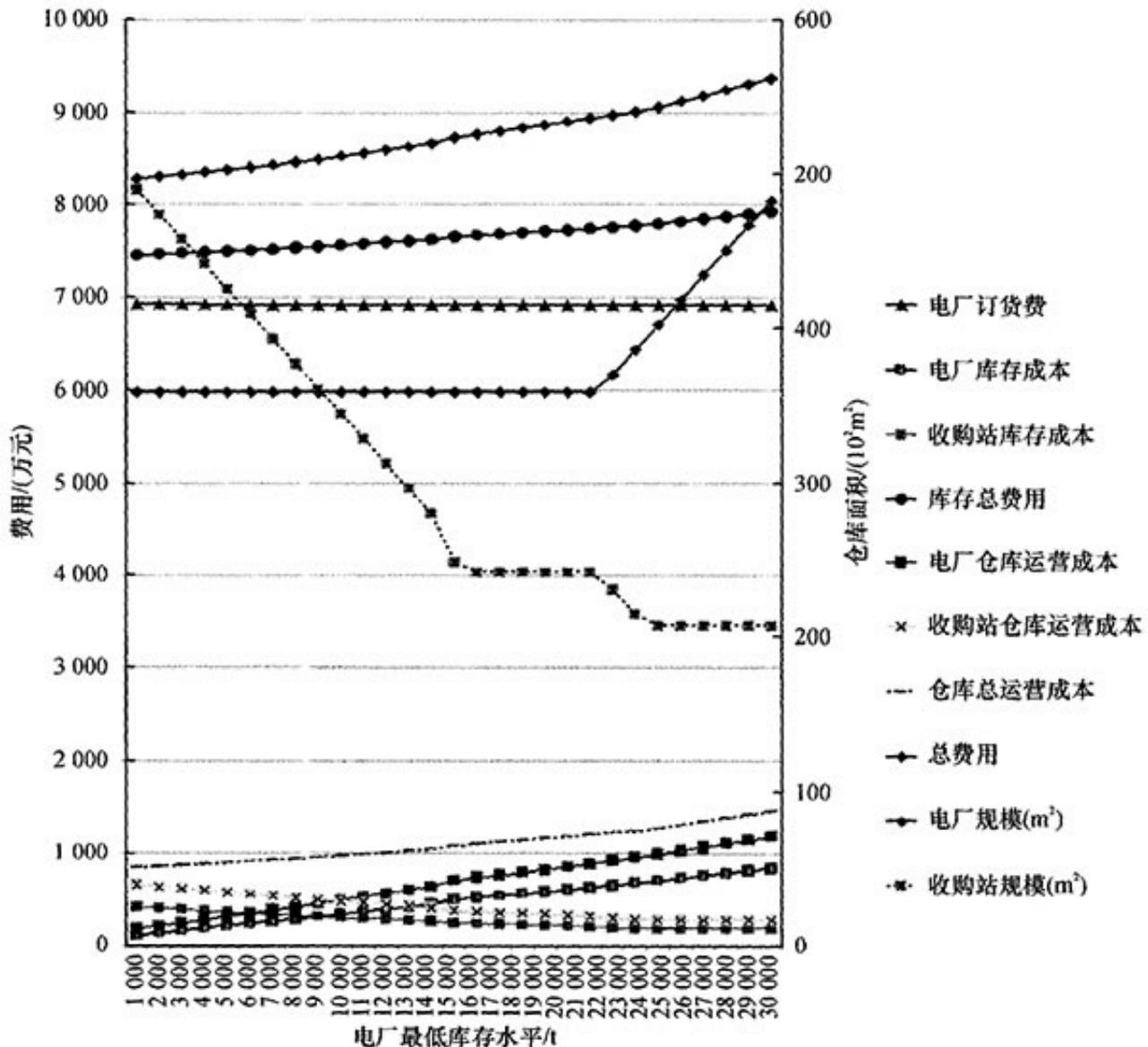


图3 电厂安全库存的敏感性分析结果

Fig. 3 Power plant safety inventory level sensitivity results

只是用农作物秸秆SSi的敏感性分析。当SS=10000,且500 SSi 10000,对电厂与收储站仓库规模没有影响,每增加500t,相应的总费用会增加1.43%,约13万元。当SSi=5000,且1000 SS 11000时,电厂仓库规模不变,和收储站规模从68493m2降到49253m2,相应的总费用增加3.34%,约28万元。

只用林木质秸秆SSi的敏感性分析。当SS=10000,且500 SSi 10000,对电厂与收储站仓库规模没有影响,每增加500t,相应的总费用会增加,约16万元。当SSi=5000,且1000 SS 18000时,对电厂于收储站仓库规模没有影响,相应的总费用会平均增加3.73%,约33万元。

### 5结论

本文研究了我国直燃生物质电厂的仓储管理问题,建立了仓库规模与库存控制联合动态规划模型,且对直燃生物质电厂的仓库规模进行优化。该模型主要内容包括:1)目标函数是使燃料长裤的运行成本及库存费用最小化;2)约束条件实际到收储站的收购能力和电厂的自购能力;3)考虑燃料季节性供应的特点,使燃料的存储空间变动在收储站与电厂建进行平衡,完成秸秆在从收储站到电厂的调度。

对30MW生物质电厂进行实际测算,分别考虑掺烧秸秆和单独使用一种生物质的情况,为企业对30MW及以下电厂

的仓库规模规划决策提供依据，通过对收储站与电厂的安全库存进行了敏感性分析，确定了电厂的长裤规模范围。

原文地址：<http://www.china-nengyuan.com/tech/109778.html>