

文章编号:1674-991X(2014)02-0158-06

基于经济统计数据的生活垃圾热值计算模型

杨涛

成都市城市环境管理科学研究院,四川 成都 610031

摘要:用神经网络法预测垃圾热值是利用当地经济和自然环境统计数据进行热值估算的方法。灰色关联度分析得出燃气普及率、年降雨量、城镇居民人均可支配收入、地区生产总值等是影响城市生活垃圾热值的主要因素,将这些影响因素作为神经网络的输入参数,结合对成都市垃圾热值的多年跟踪检测结果,利用 MATLAB 工具箱建立了基于社会经济统计数据的城市生活垃圾热值 BP 神经网络估算模型。开集和闭集测试结果表明,该模型仿真效果好,计算准确度高,仿真结果误差小,网络稳定性好,训练速度快,能够有效进行仿真计算。

关键词:生活垃圾;热值;经济发展水平;灰色关联度分析;神经网络;模型

中图分类号:X705 文献标识码:A doi:10.3969/j.issn.1674-991X.2014.02.026

Economic Statistics Based Municipal Solid Waste Heating Value Calculation Model

YANG Tao

Chengdu Academy of Urban Environmental Management Science, Chengdu 610031, China

Abstract: The neural network method to forecast the heating value of Municipal Solid Waste (MSW) is a new way to estimate heating value of MSW by using statistics of economy and natural environment. Indicated by Grey Correlation Coefficient, there are four key factors that affect the heating value of MSW, including rate of gas utilization, annual rainfall, per capita annual living expenditures of urban households and GDP. A social-economic statistics based BP neural network estimation model of the heating value of MSW was established, by using MATLAB with the statistics of those key factors and the historical tracking results of heating value of MSW from Chengdu City. The closed set and open set test show that the model has a high precision and stabilization. It can do simulation effectively with data outside of the training sample and can perform fast training.

Key words: municipal solid; heat value; level of economic development; grey relational analysis; neural network; model

垃圾热值是城市生活垃圾能否进行焚烧处理的重要指标,也是垃圾焚烧工艺的重要参数,其不仅为相关部门选择处理工艺决策提供技术支持,也对垃圾焚烧厂的设计和运行工况调整起关键性作用,在垃圾焚烧处理项目立项、工艺设计和运营管理过程中具有重要意义。垃圾热值的确定方法主要有仪器测定法和经验公式估算法^[1]。经验公式估算法通常采用物理组成热值计算模型、元素分析计算模型和工业特性分析计算模型^[2]3类。物理组成热值计算模型的关

键是准确获得相应的塑料、橡胶、纸张、木竹和水分等基础数据,元素分析计算模型需要准确测定垃圾中的元素含量,工业特性分析计算模型需要获取垃圾含水率、干基中的挥发分比例和干基中的塑料含量等^[3]。但无论是仪器检测还是以上3类数学模型计算,都是基于准确的样品采集,精确的垃圾成分分析或元素测定。由于城市生活垃圾成分复杂,性质很不稳定,样品采集受气候、天气和季节以及采样人员专业水平的影响很大,一般需由有丰富实际经验的

收稿日期:2013-09-10

作者简介:杨涛(1962—),女,高级工程师,多年从事环境监测和垃圾无害化处理研究工作, yanglike452@163.com

专业人员在不同季节连续多次进行,这对很多设计单位或垃圾热值应用部门而言存在很大的局限性。

由于垃圾热值与当地经济发展、人们消费水平和气候条件等存在非常密切的关系,有学者提出应用数学统计法建立垃圾热值和人均收入,国民生产总值,第二、第三产业生产总值及年降雨量间的数学模型^[4],探索了从经济统计数据角度预测热值的可行性。笔者拟利用成都市5个城区及部分郊区县生活垃圾热值多年按月的跟踪监测数据,用灰色关联度分析法找出垃圾热值与人们生活方式、消费水平、能源结构、气候条件及城市规模等因素的相关关系,建立基于社会经济和自然环境统计数据的生活垃圾热值计算模型,以期为无条件进行采样分析的热值使用者提供可供参考的热值估算方法。

1 数据采集

1.1 垃圾热值测定

为尽量减少人为因素造成的影响,降低垃圾采样分析过程中人工分类存在的差异,用于分析和建

模的垃圾热值,由通过实验室资质认定的成都市环境卫生监测中心进行采样和检测。样品采集和制备、物理成分分析、含水率测定、热值测定等严格按CJ/T 313—2009《生活垃圾采样和分析方法》进行。由于垃圾成分受自然因素影响较大,随降雨量和季节变化垃圾含水率变化很大,而含水率是影响垃圾热值的重要因素,为尽量避免季节的影响,采样分析每月进行1次,取其年平均值,作为垃圾热值测定结果。

1.2 变量选择

影响城市生活垃圾成分的主要因素包括社会经济发展水平、居民生活水平、城市能源结构、城市所处的自然环境和季节变化等^[5-6]。结合成都市实际情况,选取地区生产总值,第二、第三产业生产总值反映社会经济发展水平,选取城镇居民人均可支配收入和社会消费零售总额反映居民生活水平,选取城市燃气普及率反映城市能源结构,年降雨量反映自然环境,垃圾热值及各影响因素数据^[7-8]见表1。

表1 成都市生活垃圾热值及各影响因素

Table 1 Chengdu MSW heating value and impact factors

序号	地区	统计年	X_0	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6	X_7
1	锦江区	2008	4 973	3 133 890	711 138	2 414 179	2 767 000	16 768	1 021	93.62
2	锦江区	2009	5 071	3 439 013	686 337	2 744 661	3 212 000	18 696	724.2	94.01
3	锦江区	2010	4 640	4 313 879	810 790	3 494 982	3 819 000	21 148	936.8	94.42
4	锦江区	2011	4 220	5 098 038	953 353	4 137 170	4 506 420	24 109	1 003.2	95.58
5	青羊区	2008	5 597	3 513 161	864 908	2 646 668	2 531 000	16 498	1 021	93.62
6	青羊区	2009	5 045	3 939 758	916 411	3 022 200	3 019 000	18 484	724.2	94.01
7	青羊区	2010	4 530	4 902 714	1 094 805	3 807 122	3 446 752	21 125	936.8	94.42
8	青羊区	2011	4 350	5 845 369	1 294 081	4 550 498	4 067 167	24 083	1 003.2	95.58
9	金牛区	2008	5 764	3 936 051	1 226 434	2 705 710	2 439 561	16 359	1 021	93.62
10	金牛区	2009	5 431	4 366 801	1 284 484	3 079 484	2 904 322	18 191	724.2	94.01
11	金牛区	2010	4 930	5 024 990	1 455 036	3 567 237	3 415 251	20 304	936.8	94.42
12	金牛区	2011	3 980	5 928 057	1 717 006	4 208 486	4 029 996	23 147	1 003.2	95.58
13	武侯区	2008	6 353	3 465 356	1 066 535	2 396 000	2 360 697	19 195	1 021	93.62
14	武侯区	2009	6 005	3 862 029	1 133 379	2 727 194	2 812 794	21 403	724.2	94.01
15	武侯区	2010	4 270	4 713 141	1 324 645	3 387 159	3 410 669	24 210	936.8	94.42
16	武侯区	2011	4 270	5 539 334	1 547 231	3 990 914	4 024 589	27 599	1 003.2	95.58
17	成华区	2008	6 117	2 763 429	1 097 307	1 660 192	1 004 000	16 391	1 021	93.62
18	成华区	2009	6 101	3 077 913	1 177 538	1 897 158	1 194 000	18 659	724.2	94.01

(续表 1)

序号	地区	统计年	X_0	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6	X_7
19	成华区	2010	4 280	3 900 121	1 176 067	2 721 637	1 647 000	21 105	936.8	94.42
20	成华区	2011	4 350	4 767 928	1 417 952	3 347 450	1 943 460	24 060	1 003.2	95.58
21	郫县	2009	4 579	1 887 370	1 096 591	629 144	447 393	16 955	842	67.59
22	都江堰	2009	4 508	1 168 784	395 704	614 375	510 834	11 818	762	55.26
23	彭州市	2009	3 863	1 254 436	594 213	388 439	351 372	10 326	843	65.52
24	温江区	2008	4 134	1 532 259	911 983	498 683	298 324	17 109	1 048.6	80.51
25	新都区	2008	3 569	2 293 992	1 451 434	664 842	513 196	16 143	1 155.3	81.63
26	双流县	2008	3 932	3 432 997	1 674 021	1 480 530	786 071	16 817	986.5	56.49
27	金堂县	2008	3 737	1 000 794	343 315	359 710	255 495	11 909	910.3	60.32
28	锦江区	2007	4 778	2 741 578	751 205	1 982 985	2 266 369	14 308	744	91.50
29	青羊区	2007	4 437	2 996 732	773 986	2 219 915	2 074 358	14 060	744	91.50
30	金牛区	2007	4 835	3 421 314	1 127 016	2 289 538	2 004 076	14 197	744	91.50
31	武侯区	2007	5 077	2 973 342	941 209	2 028 308	1 939 768	16 378	744	91.50
32	成华区	2007	5 498	2 370 164	966 129	1 396 427	826 189	13 770	744	91.50

注: X_0 为生活垃圾低位热值,kJ/kg; X_1 为地区生产总值,万元; X_2 为第二产业生产总值,万元; X_3 为第三产业生产总值,万元; X_4 为社会消费品零售总额,万元; X_5 为城镇居民人均可支配收入,元; X_6 为年降雨量,mm; X_7 为燃气普及率,%。燃气普及率资料来源于成都市建设委员会 2008—2011 年《成都市城市(县城)和村镇建设统计年鉴》;温江区、新都区、双流县、金堂县 2008 年年降雨量资料来源于成都市水务局《2008 年成都市水资源公报》。表 2 同。

2 影响因素分析

影响垃圾热值的因素很多,且数据分布特征不明显,如何定量描述各影响因素与热值间的关联关系,需要用统计分析方法进行分析。由于多因素统计分析常采用相关与回归的方法,而回归、相关等分析方法往往要求数据量大且呈典型分布,致其计算量大,过程复杂繁琐。在关系不明确,达不到统计学显著水平的资料中,灰色关联度分析可提高分辨率,增大分辨距离,易于得出结论。与传统方法比较,其所需数据较少,对数据的要求较低,原理简单,易于理解和掌握。因此,采用灰色关联度分析,对影响垃圾热值的众多因素进行预处理,筛选出主要因素。

2.1 灰色关联度分析

灰色系统理论认为,各类系统都是由许多因素组成的,且系统及系统因素间关系复杂,形成灰色—不明确的系统,灰色关联分析即是以因素的数据列为依据,用数学方法研究因素间的几何对应关系,用灰色关联度顺序来描述系统中各因素间关系的强弱、大小和次序。

垃圾热值与垃圾的物理组成密切相关,据此将垃圾热值与影响垃圾物理成分的 7 个经济统计指标

看作为一个灰色系统,把因变量(X_0)设为参考数列,把自变量(X_1 、 X_2 、 X_3 、 X_4 、 X_5 、 X_6 、 X_7)设为比较数列(表 1)。

2.1.1 数据变换

由于系统中各因素的量纲不同,因此对原始数据需要消除量纲,把杂乱无章的原始资料,经过一个公共点(如均值、初始值等),将非典型分布数据转化为有一定分布规律的数据,便于分析研究。数据无量纲处理方法包括初值化、均值化等^[9],初值化法适用于较稳定的社会经济现象的无量纲化,而均值化比较适用于没有明显升降趋势现象的数据处理。笔者采用均值化处理,即分别求出各原始数列的平均值,再用该数列中的所有数据除以该数列的平均值,得到每个数据相对于其平均数的倍数数列,即均值化数列。

2.1.2 求关联系数和关联度

在灰色关联度分析中,第 k 时刻比较数列 X_i ($i=1,2,\dots,7$)与参考数列 X_0 的关联程度由关联系数($\zeta_i(k)$)来反映,而 X_i 与 X_0 在各时期的关联系数之平均值定量地反映了这 2 个数列间的关联程度,用关联度(γ_i)表示,关联度数据越大,说明二者间关联程度越高。关联系数和关联度的计算公

式为:

$$\zeta_i(k) = \frac{\Delta_{\min} + \rho \Delta_{\max}}{\Delta_i(k) + \rho \Delta_{\max}} \quad (1)$$

式中, ρ 为分辨系数, 其作用在于提高关联系数间的差异显著性, $0 < \rho < 1$, 一般取 ρ 为 $0.5^{[10]}$ 。

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

根据变换后的数据计算各比较数列同参考数列在同一时期的绝对差 $\Delta_i(k) = |X_0(k) - X_i(k)|$, 并找出所有比较序列在各点绝对差中的最小值 Δ_{\min} 和最大值 Δ_{\max} 。将 $\Delta_i(k)$ 、 Δ_{\min} 和 Δ_{\max} 代入式(1)和(2), 即求出 $X_i(k)$ 对 $X_0(k)$ 的 $\zeta_i(k)$ 和 X_i 对 X_0 的 γ_i (表2)。

表2 各影响因素与垃圾热值的关联度及排序

Table 2 Correlation and Sequence of MSW heating value and impact factors

参数	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6	X_7
γ_i	0.670 3	0.701 8	0.631 9	0.613 2	0.735 5	0.761 9	0.828 5
排序	5	4	6	7	3	2	1

注: $X_1 \sim X_7$ 含义同表1。

2.2 结果分析

从表2可知, 各影响因素与生活垃圾热值的 γ_i 依次为: 燃气普及率 > 年降雨量 > 城镇居民人均可支配收入 > 第二产业生产总值 > 地区生产总值 > 第三产业生产总值 > 社会消费品零售总额。因此, 在建模时拟采用与热值关联度较高的燃气普及率、年降雨量、城镇居民人均可支配收入和第二产业生产总值、地区生产总值5个变量作为成都市生活垃圾热值变化指标。

3 BP神经网络模型的建立与检验

垃圾热值预测最常用的三大类经验公式模型, 主要是应用垃圾的物理成分或元素含量作为预测的输入, 通过对大量统计数据进行线性回归分析, 建立回归方程。但经济统计数据与垃圾热值间关系复杂, 且呈非线性和非确定性, 因此, 具有强大的容错、解算能力和处理实际问题能力等诸多优点的神经网络模型则更适用于经济统计数据作为预测输入的生活垃圾热值计算分析。

神经网络是具有快速信息处理能力、分布式信息存储记忆能力、极高的自适应和自学习能力、较强的容错能力的一类大规模非线性系统, 神经网络在高度模拟复杂的非线性系统方面被认为是非线性分析技术的有效工具。因此其非常适用于非线性和非确定性领域^[11-12], 如生活垃圾热值计算分析等。前向反馈(back propagation, BP)网络是目前技术最成熟, 应用最广泛的神经网络之一^[13]。利用MATLAB工具箱建立基于社会经济和自然环境统计数据的城市生活垃圾热值BP神经网络估算模型。

3.1 BP模型设计^[14-15]

BP神经网络最重要的是网络拓扑结构的搭建和学习速率的取值大小, 网络拓扑结构决定网络的推理能力, 其由网络的平面层数和神经元共同决定。网络层数通常设计为包含输入层、输出层、一个隐含层的三层BP网络。输入层设燃气普及率、年降雨量、城镇居民人均可支配收入和第二产业生产总值、地区生产总值5个参数, 输出层为垃圾热值。因此, 输入层神经元节点数 $m = 5$, 输出层神经元节点数 $n = 1$, 隐含层神经元节点数参照下式计算:

$$l = \sqrt{m + n} + a, a \text{ 为常数}(1 \sim 10) \quad (3)$$

训练中, 应用逐步增长法从4开始对应不同的学习速率, 根据训练过程中梯度变化和均方误差变化值来确定。学习速率一般选择为0.01~0.1, 训练时取0.01, 0.05和0.1进行分析。在同样的学习速率下, 必须选择一个合适的目标误差精度, 精度取值过大, 虽然训练速度加快, 但仿真能力差, 不能达到要求; 若取值过小, 则网络训练时间增长, 网络容错能力变差。因此, 选取均方误差为0.000 1, 0.000 5, 0.001和0.005的目标误差精度来分析学习速率对模型仿真结果和网络性能的影响, 最终确定目标精度。

3.2 BP网络求解过程

(1) 训练样本数据采用表1中序号为1~27的数据, 序号为28~32的数据不参与训练, 用于检验模型的仿真效果。在MATLAB 7.0的M文件编辑器中, 输入表1中 X_1 、 X_2 、 X_5 、 X_6 、 X_7 作为输入数据矩阵, 相对应的生活垃圾低位热值为目标数据矩阵。

(2) 利用Premnmx函数对输入数据矩阵和目标

矩阵的数据进行归一化处理,归一化处理后最小值为 -1,最大值为 1。

(3)利用处理好的数据对网络进行训练:直接应用工具箱中 newff 函数建立 BP 网络,并用 traingdx 函数进行梯度下降法训练,用双曲正切 S 函数作为输入层和隐含层的功能函数,采用线性函数作为输出层的功能函数。

当取隐含层节点数为 11,学习速率为 0.05,均方误差精度为 0.000 5 时,网络训练结果见图 1。从图 1 可以看出,当迭代至 1 821 次时,误差曲线平滑收敛。

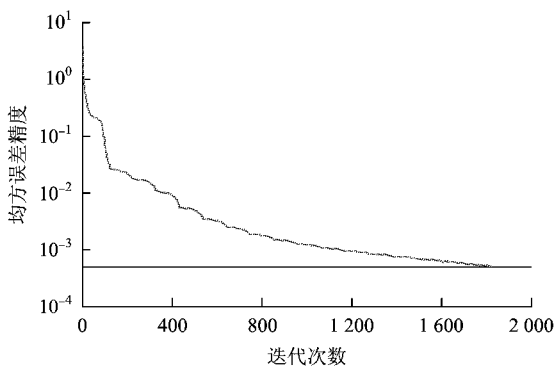


图 1 网络训练结果

Fig. 1 Network training result

3.3 BP 模型仿真结果检验

通过 BP 模型的建立,找出隐含在经济统计和自然统计数据与生活垃圾热值间的非线性映射关系。利用训练好的 BP 网络对训练样本数据进行仿真,并将仿真结果与实测热值进行对比测试(闭集测试,图 2),其可以考察模型的准确性。从图 2 可以看出,二者之间非常接近,误差极小,仿真结果能够很好地反映实测值。

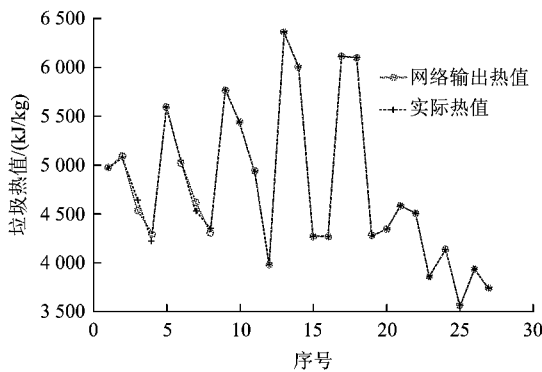


图 2 原始数据与仿真数据对比

Fig. 2 Raw data vs. simulation data comparison chart

利用训练好的 BP 网络对表 1 中序号为 28 ~ 32 的数据进行仿真(开集测试,表 3),其可考察模型计算结果的有效性。从表 3 可以看出,除 1 组数据的误差率略超 5% 外,其他 4 组数据的误差率都在 5% 以内,可以认为该模型估算热值的有效性较好。在模型的设计过程中,也可通过开集测试来继续调整隐含层节点数、学习速率取值和均方误差精度取值,以便使模型仿真更加逼近真实值。

表 3 神经网络模型的开集测试

Table 3 Neural network model open set test

序号	实测值/ (kJ/kg)	仿真值/ (kJ/kg)	误差值/ (kJ/kg)	误差 率/%
28	4 778	4 452	226	4.73
29	4 437	4 333	104	2.34
30	4 835	4 811	24	0.5
31	5 077	4 922	155	3.05
32	5 498	5 214	288	5.24

4 结论

(1)灰色关联度分析表明,城市生活垃圾热值与该地区的燃气普及率、年降雨量和城镇居民人均可支配收入关系最为密切;其次是第二产业生产总值、地区生产总值;之后是第三产业生产总值和社会消费品零售总额。燃气普及率的提高,可减少垃圾成分中的灰分等无机物含量,增加垃圾热值。年降雨量直接影响垃圾含水率,故可在垃圾收集运输过程中控制雨水的进入,减少雨水对垃圾热值的影响。

(2)利用 MATLAB 工具箱,结合多年对成都市垃圾热值的跟踪检测结果,建立了基于经济统计数据 and 自然环境统计数据的 BP 神经网络模型。通过开集和闭集测试,表明建立的模型仿真效果好,计算准确度高,仿真结果误差较小,且网络稳定性好,训练速度快,能够有效进行仿真计算。结果表明,BP 神经网络模型可作为无条件进行采样分析时的一种热值估算方法。

参考文献

[1] THIPSE S S, SHENG C, BOOTY M R. Chemical make up and physical characterization of a synthetic fuel and methods of heat content evaluation for studies on MSW incineration [J]. Fuel, 2002, 81 (2) : 211-217.

[2] ABU-QUDAIS M, ABU-QUDAIS H A. Energy content of municipal

- solid waste in Jordan and its potential utilization [J]. *Energy Conversion and Management*, 2000, 41(9): 983-991.
- [3] 王开源. 城市生活垃圾热值计算模型研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2007.
- [4] 孙巍, 陶怀志, 陈晓春. 人工神经网络在市政垃圾热值预测中的应用[J]. *中国环保产业*, 2005(8): 34-36.
- [5] 杜吴鹏, 高庆先, 张恩琛. 中国城市生活垃圾排放现状及成分分析[J]. *环境科学研究*, 2006, 19(5): 85-90.
- [6] 何德文, 金艳, 柴立元. 国内大中城市生活垃圾产生量与成分的影响因素分析[J]. *环境卫生工程*, 2005, 13(4): 7-10.
- [7] 成都统计局. 2010—2012 成都统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2010-2012.
- [8] 成都市气象局. 成都市 2009 年度气候公报[EB/OL]. (2009-12-30) [2013-07-30]. <http://www.cdws.info/wnfw/qhgb/20091230103143738.html>.
- [9] 孙芳芳. 浅议灰色关联度分析方法及其应用[J]. *科技信息*, 2010(17): 880-882.
- [10] 刘思锋. 灰色系统理论及其应用[M]. 北京: 科学出版社, 1999.
- [11] YAO H M, VUTHALURU H B, TADE M O, et al. Artificial neural network-based prediction of hydrogen content of coal in power station boilers[J]. *Fuel*, 2005, 84(12/13): 1535-1542.
- [12] 张瑛华, 张友富, 王洪. 基于神经网络的生活垃圾低位热值计算模型的研究与应用[J]. *电力建设*, 2010, 31(9): 94-97.
- [13] 卓金武. MATLAB 在数学建模中的应用[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2011.
- [14] STRIK D P B T B, DOMNANOVICH A M, ZANI L, et al. Prediction of trace compounds in biogas from anaerobic digestion using the MATLAB Neural Network Toolbox[J]. *Environmental Modelling & Software*, 2005, 20(6): 803-810.
- [15] VEGA-CARRILLO H R, HERNÁNDEZ-DÁVILA V M, MANZANARES-ACUÑA E, et al. Neutron spectrometry using artificial neural networks[J]. *Radiation Measurements*, 2006, 41(4): 425-431. ○

欢迎订阅 2014 年《环境工程技术学报》

《环境工程技术学报》是由中华人民共和国环境保护部主管, 中国环境科学研究院主办的综合性学术期刊。主要刊载国内外环境工程技术领域的最新研究成果, 报道环境工程及环保实用技术应用的典型案例, 关注环保产业政策和行业动态, 以及环境工程新技术、新成果的转化应用。本刊主要面向环境、生态、管理工程技术学领域的科研人员、技术研发人员、各级环保管理人员、环保企业经营者与生产者以及相关大专院校师生。

《环境工程技术学报》为双月刊, 大 16 开, 单月 20 日出版。每期订价 30 元, 全年 180 元。欢迎国内读者到当地邮局订阅, 邮发代号: 2-620; 中国国际图书贸易总公司承担本刊国外发行, 发行代号: 6338BM。如有漏订可直接与编辑部联系。

编辑部地址: 北京市朝阳区安外大羊坊 8 号 中国环境科学研究院

邮政编码: 100012

电话 / 传真: 010-84915126

网 址: www.hjgcjsxb.org.cn

电子邮箱: hjgcjsxb@vip.163.com