

doi:10.3969/j.issn.1000-6362.2016.05.004

毛洋洋,赵艳霞,张祎,等.五个常见日太阳总辐射模型在华北地区的有效性验证及分析[J].中国农业气象,2016,37(5):520-530

五个常见日太阳总辐射模型在华北地区的有效性验证及分析*

毛洋洋¹, 赵艳霞^{2**}, 张祎², 胡正华^{1**}

(1.南京信息工程大学气象灾害预报预警与评估协同创新中心/耶鲁大学-南京信息工程大学大气环境中心,南京 210044;2.中国气象科学研究院,北京 100081)

摘要:在地学、农学等领域,日总辐射量是一个很重要的参数,但相比常规气象观测站,全球辐射观测站的数量却很少,因此,太阳辐射的估算一直受到重视。本文在分析比较前人建立的太阳总辐射模型的基础上,选取较常见且有代表性的5个模型:Angstrom-Prescott模型(I)、Ogelman模型(II)、Bahel模型(III)、日照百分率和气温日较差综合模型(IV)和刘可群等模型(V)。用华北地区6个代表站点2001-2010年的逐日太阳总辐射观测数据,按照整个分析期(10a)、不同季节、不同天气3种情况,对5个模型模拟的效果进行对比与分析。结果表明:(1)5个模型在各代表站点模拟的逐日太阳总辐射值与该站实测值间具有极显著的正相关关系($P < 0.01$),相关系数(R)均在0.93以上,平均绝对误差(MAPE)均在9.68%~17.56%,归一化均方根误差(NRMSE)在12.47%~23.12%,模拟结果大多为“好”,个别为“可以接受”,说明5个模型及相应的系数适合估算华北地区日太阳总辐射。(2)分析期内,5个模型在6个站点的MAPE平均值分别为14.28%、14.93%、12.78%、12.27%、13.01%,相应的NRMSE平均值分别为18.80%、19.71%、17.09%、16.27%、17.24%,模拟结果为“好”,其中模型IV误差最小,但与模型III和V无显著差异。(3)模型I-V的MAPE平均值在春季依次为11.97%、12.19%、11.17%、10.86%、11.24%,相应的NRMSE平均值依次为15.46%、15.75%、14.27%、13.95%、14.27%;夏季MAPE平均值依次为14.46%、15.47%、13.32%、12.45%、13.36%,相应的NRMSE平均值依次为18.89%、20.21%、17.21%、16.22%、17.05%;秋季MAPE平均值依次为14.81%、15.65%、12.67%、12.19%、12.20%,相应的NRMSE平均值依次为18.94%、20.00%、16.66%、15.94%、15.95%;冬季MAPE平均值依次为18.08%、18.56%、15.19%、14.99%、14.11%,相应的NRMSE平均值依次为22.52%、23.28%、19.42%、19.06%、18.31%。总体上,四个季节的模拟结果大多为“好”,个别为“可以接受”;春、夏、秋季,模型IV误差最小;在冬季模型V最小,模型IV次之。(4)模型I-V的MAPE平均值,在有日照时,依次为11.23%、12.03%、9.52%、9.32%、9.94%,相应的NRMSE平均值依次为14.92%、15.92%、12.75%、12.44%、13.13%。模拟结果均为“好”,其中模型IV误差最小;无日照时,MAPE平均值依次为49.25%、47.92%、49.71%、46.03%、45.51%,相应的NRMSE平均值依次为61.92%、62.09%、61.89%、58.02%、55.70%,模拟结果均为“不好”。综合分析可知,5个模型均可用于估算华北地区日太阳总辐射,但模型IV即日照百分率和气温日较差综合模型精度最高。

关键词:太阳辐射; Angstrom-Prescott模型; Bahel模型; 华北地区

Validation and Analysis of Five General Daily Solar Radiation Estimation Models Used in Northern China

MAO Yang-yang¹, ZHAO Yan-xia², ZHANG Yi², HU Zheng-hua¹

(1. Collaborative Innovation Center on Forecast Meteorological Disaster Warning and Assessment, Nanjing University of Information Science & Technology/Yale-NUIST Center on Atmospheric Environment, Nanjing 210044, China; 2. Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081)

Abstract: Daily solar radiation is a very important parameter in earth science, agriculture science, and other fields. However, compared with the conventional meteorological observatory, there were few observatories of the global

* 收稿日期: 2016-03-02

** 通讯作者。E-mail: zyx@camsma.cn; zhhu@nuist.edu.cn

基金项目: 黄淮海“永优”(浚单)玉米系列品种气候适应性关键技术(GYHY201406026)项目; 公益性行业(气象)科研专项(重大专项)“中国干旱气象科学研究—我国北方干旱致灾过程及机理”(GYHY201506001-6)

作者简介: 毛洋洋(1988-),女,硕士生,主要研究方向为作物模型。E-mail: 1306772090@qq.com

radiation. Therefore, the estimation of solar radiation had become a focus. Five representative models, such as Angstrom-Prescott model, Ogelman model, Bahel model, the comprehensive model of sunshine duration and diurnal temperature range, and Liu's model (named model I to V), were used to estimate solar radiation in this paper, under the analysis and comparison previous solar radiation estimation models. Daily observation solar radiation data (from 2001 to 2010) of six representative stations in Northern China Plain were used to compare the effect of five models, according to the whole analysis period (about 10 years), different seasons, and weather conditions. The results showed that: (1) in each representative station, simulated values of five models had an extremely significant positive correlation between the measured values ($P < 0.01$), the correlation coefficient (R) were above 0.93, the mean absolute percentage error (MAPE) were within 9.68% - 17.56%, and the normalized root mean square error (NRMSE) were within 12.47% - 23.12%. The simulation results mostly were "good", individual as an "acceptable". Five models and the corresponding coefficient showed high accuracy in estimating the solar radiation in Northern China. (2) During the whole analysis period, the average value of MAPE (AMAPE) of five models were 14.28%, 14.93%, 12.78%, 12.27%, and 13.01%, respectively, corresponding to the average value of NRMSE (ANRMSE) were 18.80%, 19.71%, 17.09%, 16.27%, and 17.24%, respectively, indicating all of the simulation results were "good". Model IV was the best, following by model III and V. (3) In spring, AMAPE of five models were 11.97%, 12.19%, 11.17%, 10.86%, and 11.24%, respectively, corresponding to ANRMSE were 15.46%, 15.75%, 14.27%, 13.95%, and 14.27%, respectively. In summer, AMAPE of five models were 14.46%, 15.47%, 13.32%, 12.45%, and 13.36%, corresponding to ANRMSE were 18.89%, 20.21%, 17.21%, 16.22%, and 17.05%, respectively. In autumn, AMAPE of five models were 14.81%, 15.65%, 12.67%, 12.19%, and 12.20%, corresponding to ANRMSE were 18.94%, 20.00%, 16.66%, 15.94%, and 15.95%, respectively. In winter, AMAPE of five models were 18.08%, 18.56%, 15.19%, 14.99%, and 14.11%, corresponding to ANRMSE were 22.52%, 23.28%, 19.42%, 19.06%, and 18.31%, respectively. In general, most simulation results were "good", individual was "acceptable", in the four seasons. Model IV showed best in spring, summer, and autumn, while model V showed best in winter, following by model IV. (4) Under the condition that sunshine duration existed, AMAPE of five models were 11.23%, 12.03%, 9.52%, 9.32%, and 9.94%, respectively, corresponding to ANRMSE were 14.92%, 15.92%, 12.75%, 12.44%, and 13.13%, respectively. All of the simulation results were "good", model IV showed best. In contrast, without sunshine duration, AMAPE of five models were 49.25%, 47.92%, 49.71%, 46.03%, and 45.51%, respectively, corresponding to ANRMSE were 61.92%, 62.09%, 61.89%, 58.02%, and 55.70%, respectively. All of the simulation results were "bad". In summary, five models could be used to estimate the daily solar radiation in Northern China Plain, and model IV (the comprehensive model of sunshine duration and diurnal temperature range) showed the highest accuracy.

Key words: Solar radiation estimation; Angstrom-Prescott model; Bahel model; Northern China Plain

在生物物理模型、生态系统过程模型、作物生长模型和水文模拟模型等多种模型以及参考作物蒸散量^[1-2]、太阳辐射直接透射率^[3]等的推算中,太阳辐射都是必不可少的参数。但太阳辐射观测数据严重匮乏^[4],从全球看,气象观测台站总数与有太阳辐射观测的台站数之比为 500:1,在中国 2500 多个气象观测台站中有太阳辐射观测项目的台站仅 110 个左右,比率约为 25:1。由于辐射观测站较少,太阳辐射的估算一直受到各国科学家的重视,提出了多

种利用常规气象要素如日照时数、温度、云量、湿度、降水等估算太阳辐射的模型^[4-11]。

目前普遍应用的是日照百分率模型,其中最常用的是 Angstrom-Prescott 模型(简称 A-P 模型),由 Angstrom 基于晴天太阳总辐射在 1924 年提出^[12],1940 年 Prescott 又基于天文辐射对其进行了修正^[13]。在中国,利用 A-P 模型估算太阳辐射的研究较多,如 1963 年左大康等^[14],1964 年翁笃鸣^[15],1980 年王炳忠^[16],2010 年何清华等^[17],2014 年王晨亮等^[18]。

2006 年 Yang 等^[19]提出利用 Ogelman 模型估算太阳总辐射, 并利用中国部分站点的实测资料进行验证, 发现其效果优于 A-P 等传统方法。Almorox 等^[20]比较了 4 种日照百分率模型, 发现 Bahel 模型优于 A-P 模型和 Ogelman 模型。

鉴于气温数据易于获取, 并且具有很好的可靠性, 由温度推算辐射的温度模型也得到一定应用^[21]。在对日照百分率模型、气温日较差模型、日照百分率和气温日较差综合模型推算中国的逐日太阳辐射的比较研究中发现, 气温日较差模型拟合效果最差^[22-23], 而日照百分率和气温日较差综合模型取得了比经典的 Angstrom 模型和 Bahel 模型更高的精度^[22]。

2008 年刘可群等利用日照百分率、降水量和大气可降水量、温度日较差等因子, 建立了有日照和无日照条件下的日太阳总辐射模型, 优于 A-P 模型^[24]。2014 年杨金明等^[25]也证实了这一观点。2014 年陶求华等尝试建立了水平面太阳辐射与气象数据和空气污染物观测数据回归模型^[26]。2015 年喻丽等利用非线性回归法建立了以气温日较差、天文日照百分率和空气污染指数为主导因子的太阳日总辐射估算模型^[27]。这两个模型因过于复杂及资料不易获取而较少使用。

在众多估算太阳辐射的模型中, 哪个模型最适合估算日太阳总辐射, 目前还无共识。本文选取 Angstrom-PreScott 模型(I)、Ogelman 模型(II)、Bahel 模型(III)、日照百分率和气温日较差综合模型(IV)、刘可群等模型(V) 5 个较常见和有代表性的模型, 按模型由简单到复杂, 要素由少到多, 利用华北地区 6 个代表站点 2001-2010 年数据进行验证和比较, 以期为华北地区无辐射资料记录的台站估算日太阳辐射提供选择依据。

1 资料与方法

1.1 数据

研究数据来自华北地区太阳辐射和其它气象要素观测数据齐全的河北省乐亭站(1992-2010 年), 山东省济南站(1981-2010 年)和莒县站(1990-2010 年), 以及河南省郑州站(1981-2010 年)、南阳站(1990-2010 年)和固始站(1981-2010 年), 包括逐日日照时数、最高气温、最低气温、降水量、水汽压、太阳总辐射资料, 研究区域及站点的地理分布如图 1 所示, 台站基本信息见表 1。

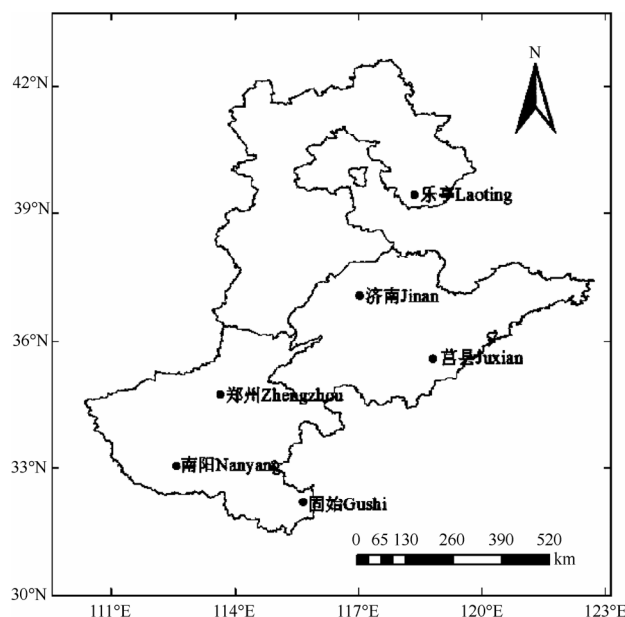


图 1 研究站点的地理分布

Fig. 1 The geographical distribution of the selected meteorological stations

1.2 太阳日总辐射估算模型

以 Q 表示到达地表的太阳总辐射 ($\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$), Q_0 表示天文辐射 ($\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$), n 表示日照时数 (h), N 表示理想日照时数或最大可照时数 (h), T_M 表示

表 1 台站基本信息

Table 1 Basic information of the stations

省份 Province	站名 Station	经度 Longitude	纬度 Latitude	海拔高度 Altitude(m)	资料年份 Data year
河北 Hebei	乐亭 Laoting	118°22'E	39°26'N	11	1992-2010
山东 Shandong	济南 Jinan	117°03'E	37°03'N	170	1981-2010
	莒县 Juxian	118°50'E	35°35'N	107	1990-2010
河南 Henan	郑州 Zhengzhou	113°39'E	34°43'N	110	1981-2010
	南阳 Nanyang	112°35'E	33°02'N	129	1990-2010
	固始 Gushi	115°40'E	32°10'N	43	1981-2010

日最高气温 (), T_m 表示日最低气温 (), W 表示大气可降水量 (mm), P 表示日降水量 (mm), Abs 表示大气降水与可降水量影响因子。5 个模型可分别表示为

模型 I : A-P 模型

$$\frac{Q}{Q_0} = a + b \frac{n}{N} \quad (1)$$

式中, 系数 $a=0.161$ $b=0.614$ 数值来自文献[18], 模型采用 122 个站点 1961-2010 年日照时数与太阳辐射站点资料, 用地理加权回归得到全国尺度连续变化的 Angstrom-Prescott 系数, 文献认为该系数适用于全国, 且用该系数估算的日总辐射误差较小。

模型 II : Ogelman 模型

$$\frac{Q}{Q_0} = a + b \frac{n}{N} + c \left(\frac{n}{N}\right)^2 \quad (2)$$

式中, 系数 $a=0.1404$ $b=0.6126$ $c=0.0351$, 数值来自文献[28], 基于 69 个站点 40a 太阳辐射数据的基础上研究得到, 用该系数估算的日总辐射在同类型模型中误差最小。

模型 III : Bahel 模型

$$\frac{Q}{Q_0} = a + b \left(\frac{n}{N}\right) + c \left(\frac{n}{N}\right)^2 + d \left(\frac{n}{N}\right)^3 \quad (3)$$

式中, 系数 $a=0.17$ $b=0.93$ $c=-1.08$ $d=0.73$, 数值来自文献[22], 基于 48 个站点 1994-1998 年气象资料得到的经验值, 用该系数估算的日总辐射在同类型模型中误差最小。

模型 IV : 日照百分率和气温日较差综合模型

$$\frac{Q}{Q_0} = a \ln(T_M - T_m) + b \left(\frac{n}{N}\right)^c + d \quad (4)$$

式中, 系数 $a=0.04$ $b=0.48$ $c=0.83$ $d=0.11$, 数值来自文献[22]。

模型 V : 刘可群等模型

有日照条件为

$$\frac{Q}{Q_0} = a_0 + a_1 \left(\frac{n}{N}\right) + a_2 \lg(W + P) \quad (5)$$

无日照条件为

$$\frac{Q}{Q_0} = b_0 + b_1(T_M - T_m) \times (1 - Abs) \quad (6)$$

当天记录的日照时数大于 0 时, 为有日照; 等于 0 则为无日照。文献[24]未给出适于华北地区的系数值, 本文利用乐亭 1992-2000 年、莒县和南阳 1990-2000 年以及济南、固始和郑州 1981-2000 年逐日气象数据和辐射观测数据通过 SPASS 拟合得到,

$$a_1=0.464, a_2=-0.003, a_0=0.221, b_0=0.071, b_1=0.015。$$

天文辐射 Q_0 和最大可照时数 N 采用 FAO 推荐的方法计算^[29], 即

$$Q_0 = \frac{24 \times 60}{\pi} 0.082 d_r (w_s \sin \varphi \sin \delta + \cos \varphi \cos \delta \sin w_s) \quad (7)$$

$$d_r = 1 + 0.33 \cos\left(\frac{2\pi}{365} J\right) \quad (8)$$

$$\delta = 0.409 \sin\left(\frac{2\pi}{365} J - 1.39\right) \quad (9)$$

$$w_s = \arccos(-\tan \varphi \tan \delta) \quad (10)$$

$$N = \frac{24}{\pi} w_s \quad (11)$$

式中, φ 为地理纬度(°); δ 为太阳的磁偏角(°); w_s 为日落的角度(°); J 为 1a 内日序; d_r 为日地相对距离; N 为最大可照时数 (h); π 为圆周率 (取值 3.1416)。

大气可降水量 W 和大气降水与可降水量影响因子 Abs 根据下式计算^[30]

$$W = 10^{0.0337T_d + 0.849} \quad (12)$$

$$Abs = \frac{0.29(W + 10P)}{0.5925(W + 10P) + [1 + 14.15(W + 10P)]^{0.635}} \quad (13)$$

式中, T_d 为露点温度(°); P 为日降水量 (mm), T_d 依据中国气象局地面气象观测规范^[31]计算, 即

$$T_d = \frac{g \times \lg \frac{e}{E_0}}{k - \lg \frac{e}{E_0}} \quad (14)$$

式中, e 为日平均水汽压 (hPa), E_0 为 0 时的饱和水汽压, 其值为 6.1078hPa, g 、 k 为系数, 其值分别为 243.92 和 7.69。

1.3 模型效果评价方法

采用相关系数 R , 平均绝对误差 (MAPE), 均方根误差 (RMSE) 和归一化均方根误差 (NRMSE) 进行评价。

$$MAPE = \frac{100}{n} \frac{\sum_{i=1}^n |O_i - S_i|}{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n O_i} \quad (15)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (O_i - S_i)^2}{n}} \quad (16)$$

$$NRMSE = \frac{RMSE}{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n O_i} \times 100 \quad (17)$$

式中， S_i 为模拟值， O_i 为实测值， n 为样本数。

R 可反映模拟值与实测值之间的一致性，其值愈接近 1 说明模拟效果愈好；MAPE 反映了模拟值与实测值之间的误差，其值越小模拟效果越好；RMSE 和 NRMSE 反映了离散程度，其值愈小，表明模拟效

果愈好。NRMSE < 10% 表示模拟效果“非常好”，10% ~ 20% 表示“好”，20% ~ 30% 表示“可以接受”，> 30% 表示“不好”^[32]。

2 结果与分析

2.1 分析期代表站点日太阳总辐射的模拟效果

用 5 个模型分别模拟 6 个站点 2001-2010 年逐日太阳总辐射，并与实测值进行对比分析，结果如表 2 所示。由表可见，5 个模型在各代表站点模拟的逐日

表 2 五个模型在不同站点模拟结果的统计特征值

Table 2 Statistical characteristics values of the daily solar radiation calculated by five models in each station

站点 Station	模型 Model	相关系数(R) Correlative coefficient	平均绝对误差 Mean absolute error(MAPE,%)	均方根误差 Root mean square error (RMSE,MJ·m ⁻² ·d ⁻¹)	归一化均方根误差 Normalized root mean square error(NRMSE,%)	资料年份 Data year
乐亭 Laoting	I	0.95	11.01	2.10	15.17	2001-2010
	II	0.95	12.37	2.29	16.55	
	III	0.96	10.86	2.01	14.52	
	IV	0.96	10.60	1.94	14.06	
	V	0.96	11.34	2.04	14.84	
济南 Jinan	I	0.94	14.99	2.46	19.19	2001-2010
	II	0.94	15.39	2.55	19.82	
	III	0.94	12.33	2.10	16.35	
	IV	0.94	12.22	2.09	16.21	
	V	0.95	14.44	2.42	18.79	
莒县 Juxian	I	0.96	11.09	1.94	14.36	2001-2010
	II	0.95	11.79	2.08	15.43	
	III	0.96	10.12	1.77	13.10	
	IV	0.96	9.68	1.68	12.47	
	V	0.97	10.35	1.79	13.29	
郑州 Zhengzhou	I	0.94	14.59	2.55	19.80	2001-2010
	II	0.94	15.06	2.62	20.33	
	III	0.95	13.41	2.27	17.58	
	IV	0.95	12.32	2.11	16.34	
	V	0.96	13.47	2.25	17.45	
南阳 Nanyang	I	0.93	16.67	2.62	21.81	2001-2010
	II	0.93	17.38	2.78	23.12	
	III	0.93	14.28	2.39	19.89	
	IV	0.94	13.61	2.24	18.65	
	V	0.95	13.54	2.32	19.26	
固始 Gushi	I	0.93	17.35	2.74	22.43	2001-2010
	II	0.93	17.56	2.81	23.00	
	III	0.93	15.68	2.49	20.34	
	IV	0.93	15.20	2.44	19.91	
	V	0.94	14.91	2.42	19.80	

注：模型 I-V 分别为 Angstrom-Prescott 模型、Ogelman 模型、Bahel 模型、日照百分率和气温日较差综合模型、刘可群等模型。下同。
 Note : I is Angstrom-Prescott model, II is Ogelman model, III is Bahel model, IV is the comprehensive model of sunshine duration and diurnal temperature range, V is Liu's model. The same as below.

太阳总辐射值与该站实测值间均具有极显著的正相关关系 ($P < 0.01$), 相关系数 (R) 均在 0.93 以上, 均方根误差 (RMSE) 均小于 $2.82 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$, 平均绝对误差 (MAPE) 均在 9.68% ~ 17.56%, 归一化均方根误差 (NRMSE) 在 12.47% ~ 23.12%, 模拟结果大多为“好”, 个别为“可以接受”, 说明 5 个模型及相应的系数均适合估算华北地区日太阳总辐射。进一步分析可见, 模型 I-V 的 MAPE 范围依次为 11.01% ~ 17.35%、11.79% ~ 17.56%、10.12% ~ 15.68%、9.68% ~ 15.20% 和 10.35% ~ 14.91%, 相应的 NRMSE 为 14.36% ~ 22.43%、15.43% ~ 23.12%、13.10% ~ 20.34%、12.47% ~ 19.91% 和 13.29% ~ 19.80%。可见, 不同站点的估算误差有一定差异, 可能原因为模型中系数在不同站点理论上应有所不同, 但本文采用了同一系数。方法 I-V 的 MAPE 平均值依次为 14.28%、14.93%、12.78%、12.27% 和 13.01%, RMSE 依次为 2.40、2.52、2.17、2.08 和 2.21 $\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$, NRMSE 依次为 18.80%、19.71%、17.09%、16.27% 和 17.24%。从每个站点看, MAPE、RMSE 和 NRMSE 较大的均是模型 I 和 II, 除固始站点外, 最小的均是模型 IV。可见, 模型 I 和 II 的误差稍大, 模型 IV 的误差最小, 但与模型 III 和 V 相差很小。

2.2 不同季节代表站点日太阳总辐射的模拟效果

考虑到日太阳总辐射在不同季节的量值不同, 对 2001-2010 年逐日太阳总辐射在各个季节的模拟误差进行对比分析, 结果如图 2 和表 3 所示。从图 2 可以看出, 5 个模型在莒县和乐亭站模拟效果相对好, 济南和郑州站次之, 固始和南阳站相对较差。各站 (乐亭站除外) 每个季节均以模型 I 和 II 的误差较大, 模型 III、IV、V 相对较好。就单站而言, 从 MAPE 和 NRMSE 来看, 乐亭站在春季模拟效果最好的为模型 I 和 IV, 夏季为模型 IV, 秋季为模型 III 和 IV, 冬季为模型 IV; 济南站春、夏、秋、冬季模拟效果最好的模型分别为 III、IV、V、V; 莒县站分别为模型 IV、IV、IV、III; 郑州站各季均为模型 IV; 南阳站分别为模型 V、IV、V、V; 固始站分别为模型 V 和 III、IV、V、V。从表 3 可以看出, 在春季、夏季和秋季模型 IV 误差最小; 在冬季模型 V 误差最小, 模型 IV 次之。从 6 个站点的平均 MAPE 和 NRMSE 来看, 5 个模型均表现为春季最小, 夏、秋季居中, 冬季最大, 也即春季的模拟效果最好, 冬季最差。

表 3 季节模拟结果的误差平均值

Table 3 The average value of simulated error during each season

季节 Season	模型 Model	平均值 Average		资料年份 Data year
		MAPE (%)	NRMSE (%)	
春季 (3、4、5 月) Spring (Mar., Apr., May)	I	11.97	15.46	2001-2010
	II	12.19	15.75	
	III	11.17	14.27	
	IV	10.86	13.95	
	V	11.24	14.27	
夏季 (6、7、8 月) Summer (Jun., Jul., Aug.)	I	14.46	18.89	2001-2010
	II	15.47	20.21	
	III	13.32	17.21	
	IV	12.45	16.22	
	V	13.36	17.05	
秋季 (9、10、11 月) Autumn (Sep., Oct., Nov.)	I	14.81	18.94	2001-2010
	II	15.65	20.00	
	III	12.67	16.66	
	IV	12.19	15.94	
	V	12.20	15.95	
冬季 (12、1、2 月) Winter (Dec., Jan., Feb.)	I	18.08	22.52	2001-2010
	II	18.56	23.28	
	III	15.19	19.42	
	IV	14.99	19.06	
	V	14.11	18.31	

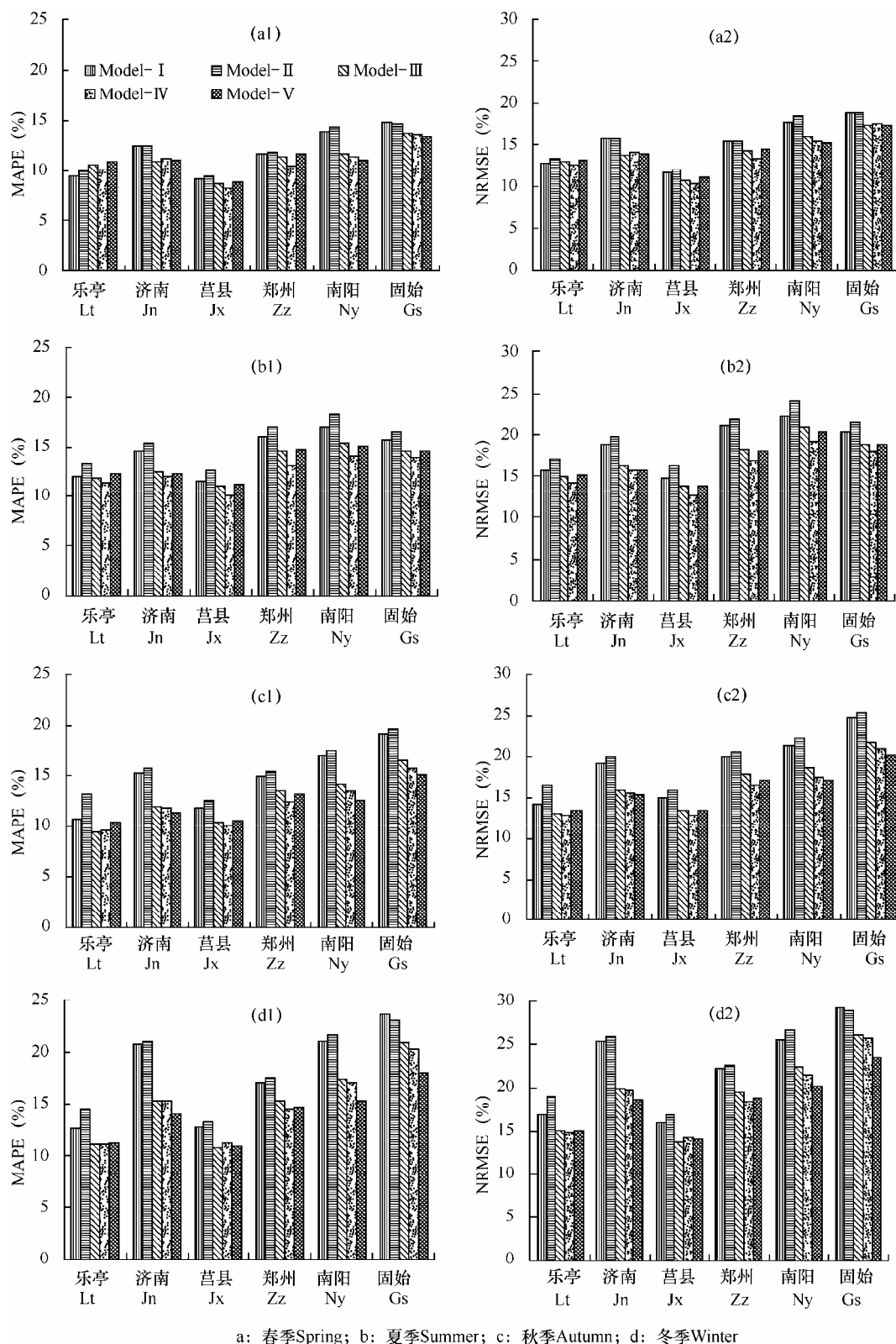


图 2 不同季节各模型在每个站点的模拟误差

Fig. 2 Simulated error of five models during different seasons in each station

注：Lt、Jn、Jx、Zz、Ny、Gs 分别代表乐亭、济南、莒县、郑州、南阳、固始。下同

Note : Lt, Jn, Jx, Zz, Ny and Gs is Laoting, Jinan, Juxian, Zhengzhou, Nanyang and Gushi, respectively. The same as below

2.3 不同天气条件下代表站点日太阳总辐射的模拟效果

对日太阳辐射的模拟结果按有、无日照两种条件进行的对比分析结果如图 3 所示,从图可以看出,当有日照时,5 个模型的 MAPE 均小于 15%,NRMSE 在 18%之内,模拟效果均为“好”。模型 I-V 的 MAPE 平均值依次为 11.23%、12.03%、9.52%、9.32%和 9.94%,RMSE 依次为 2.27、2.43、1.95、1.90 和 2.01MJ·m⁻²·d⁻¹,NRMSE 依次为 14.92%、15.92%、12.75%、12.44%和 13.13%,可见模型 IV 误差最小。对于每个站点,从 MAPE 来看,除南阳站表现为模型 III 误差最小外,其余均为模型 IV 模拟效果最好;从 RMSE、NRMSE 来看,济南和固始站表现为模型

III 误差最小,其余站点均为模型 IV 误差最小。因此,总体上模型 IV 的模拟效果最好。

无日照条件下,模型 I-V 的 MAPE 均大于 35%,RMSE 均大于 2.10MJ·m⁻²·d⁻¹(日均太阳辐射仅 4.7MJ·m⁻²·d⁻¹),NRMSE 均在 55%以上,估算效果为“不好”。模型 I-V 的 MAPE 均值依次为 49.25%、47.92%、49.71%、46.03%和 45.51%,RMSE 均值依次为 2.86、2.87、2.86、2.68 和 2.57MJ·m⁻²·d⁻¹,NRMSE 均值依次为 61.92%、62.09%、61.89%、58.02%和 55.70%。相比较而言,模型 V 的效果最好,模型次之。对于每个站点,从 MAPE、RMSE 和 NRMSE 来看,均以模型 V 表现最好,模型次之。无日照条件下,日太阳辐射的模拟需进一步研究。

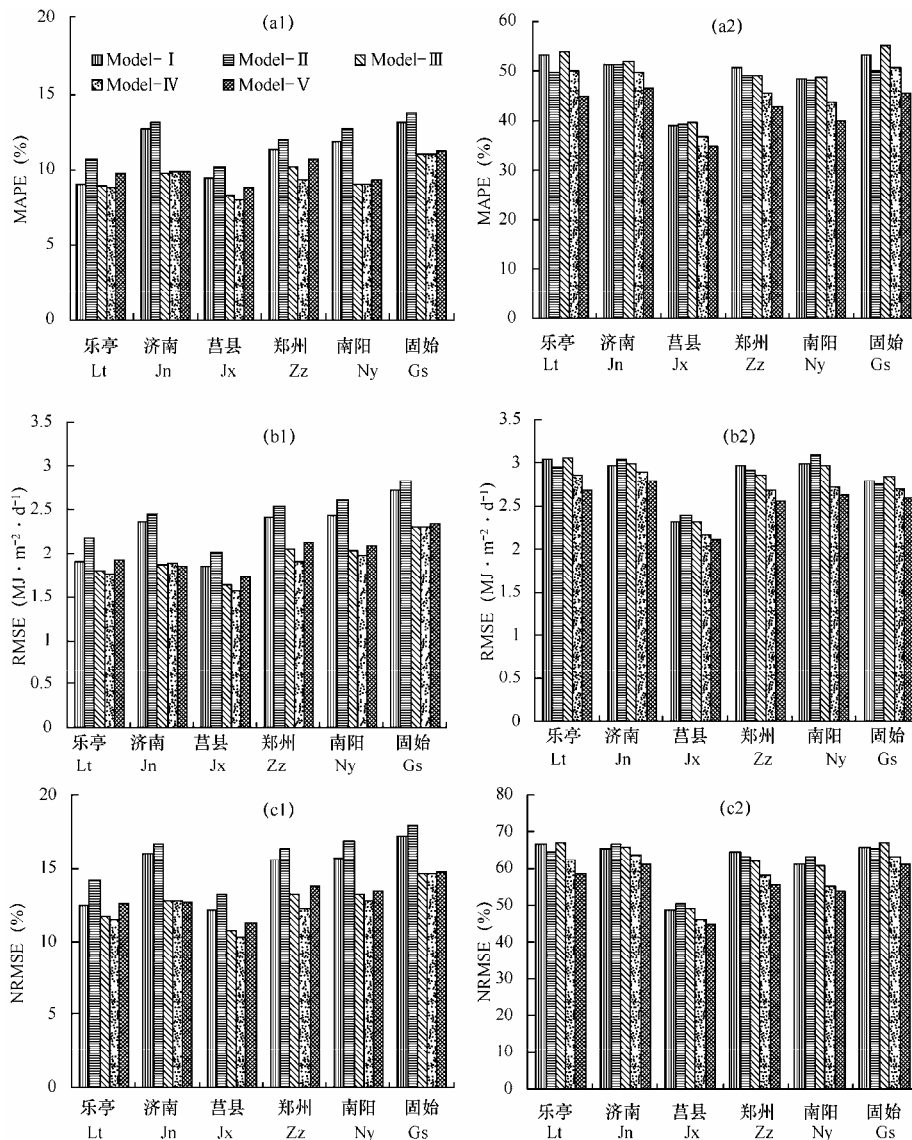


图 3 有日照(1)和无日照(2)条件下各模型的模拟误差

Fig. 3 Simulated error of five models under sunshine(1) and without sunshine(2) conditions

3 结论与讨论

Angstrom-PreScott 模型 (I)、Ogelman 模型 (II)、Bahel 模型 (III)、日照百分率和气温日较差综合模型 (IV) 和刘可群等模型 (V) 及其相应的系数均适合估算华北地区日太阳总辐射, 在莒县和乐亭站模拟效果相对好, 济南和郑州站次之, 固始和南阳站相对稍差。5 个模型均表现为春季模拟误差最小, 夏、秋季居中, 冬季最大。各模型比较而言, 在春季、夏季和秋季模型 IV 误差最小, 在冬季模型 V 误差最小, 模型 IV 次之。有日照条件下, 模型 IV 误差最小, 而无日照下模型 V 误差最小, 模型 IV 次之。考虑到模型 V 复杂且需要的气象要素多, 所以, 总体上, 在华北地区估算太阳日辐射以模型 IV 为好。

各模型的模拟结果均存在一定误差, 原因是多方面的。首先, 本文主要目的是对现有的估算模型在华北地区的适用性进行验证和分析, 因此, 未对模型及参数进行改进和调整, 文献中的经验系数是根据较早的观测数据得到的, 可能不适于当前的情况, 而本文的验证数据期限为 2001-2010 年, 因此, 也导致一定的误差。其次, 从模型本身来说, 没有考虑大气成分对太阳辐射的削弱作用, 将这种影响隐含于回归系数中, 但由于近年雾霾、城市热岛、空气污染等对太阳辐射的削弱作用加强, 系数的适用性因此降低。第三, 从有、无日照条件下的模拟分析可以看出, 无日照时的辐射模拟误差远大于有日照 (约为 4 倍), 主要是因为无日照时, 辐射值本身很小, 导致误差特征值偏大。因此, 对于无日照条件也即低量辐射的模拟需要进一步研究。

与其它研究相比, 本文 MAPE 和 RMSE 的计算结果与国内外相关研究基本一致^[6-8,12]。模型 I-V 在各个站点的模拟效果总体好于张宇等^[33-34]的研究结果。模型 III 比模型 I、II 误差小, 与 Almorox 等^[20]研究结论相同。模型 IV 比模型 I-III 误差小, 与 Chen 等^[22-23]的研究结果相同。

实际中, 如需要更加精确的辐射估算结果, 建议使用估算站点或附近站点的实测数据拟合得到适合当地的经验系数, 如有可能, 还可考虑在不同季节拟合不同的系数, 此为比较可行的提高现有模型估算精度的主要途径。

参考文献 References

[1] 商艳, 朝伦巴根, 达布希, 等. 利用估算的太阳辐射计算浑善达克沙地参考作物蒸散速率的精度分析[J]. 中国农业气

象, 2006, 27(1): 6-10.

Shang Y, Chaolunbagen, Dabuxi, et al. The accuracy analysis of reference evapotranspiration (ET₀) calculation by using estimated solar radiation in Hunshandake desert areas[J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 2006, 27(1): 6-10. (in Chinese)

[2] 曹金峰, 李玉中, 刘晓英, 等. 四种参考作物蒸散量综合法的比较[J]. 中国农业气象, 2015, 36(4): 428-436.

Cao J F, Li Y Z, Liu X Y, et al. Comparison of four combination methods for reference crop evapotranspiration [J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 2015, 36(4): 428-436. (in Chinese)

[3] 陈艳英, 邱新法, 高阳华, 等. 太阳辐射直接透射率的推算[J]. 中国农业气象, 2009, 30(4): 492-495.

Chen Y Y, Qiu X F, Gao Y H, et al. A study on calculation of direct solar radiation transmission rata[J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 2009, 30(4): 492-495. (in Chinese)

[4] 李秉柏, 马新明, 徐立华. 棉花干物质积累的模拟模型与检验[J]. 中国农业气象, 1998, 19(2): 20-24.

Li B B, Ma X M, Xu L H. Simulation model and validation of dry matter accumulation of cotton[J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 1998, 19(2): 20-24. (in Chinese)

[5] 何洪林, 于贵瑞, 牛栋. 复杂地形条件下的太阳资源辐射计算方法研究[J]. 资源科学, 2003, 25(1): 78-85.

He H L, Yu G R, Niu D. Method of global solar radiation calculation on complex territories[J]. Resources Science, 2003, 25(1): 78-85. (in Chinese)

[6] Almorox J, Hontoria C. Global solar radiation estimation using sunshine duration in Spain[J]. Energy Conversion and Management, 2004, 45(9-10): 1529-1535.

[7] Hunt L A, Kuchar L, Swanton C J. Estimation of solar radiation for use in crop modeling[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 1998, 91(3-4): 293-300.

[8] Podesta G P, Nunez L, Villanueva C A, et al. Estimating daily solar radiation in the Argentine Pampas [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2004, 123(1-2): 41-53.

[9] 刘建栋, 于强, 金之庆, 等. 冬小麦叶片光合作用农业气象数学模型研究[J]. 中国农业气象, 2003, 24(1): 22-25.

Liu J D, Yu Q, Jin Z Q, et al. Study on an agrometeorological model to simulate the leaf photosynthesis of winter wheat in Huanghuaihai Region[J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 2003, 24(1): 22-25. (in Chinese)

[10] Hoogenboom G. Contribution of agrometeorology to the simulation of crop production and its applications [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2000, 103(1-2): 137-157.

[11] 许吟隆, Richard Jones. 利用 ECMWF 再分析数据验证 PRECIS 对中国区域气候的模拟能力[J]. 中国农业气象, 2004, 25(1): 5-9.

- Xu Y L, Richard J. Validating PRECIS with ECMWF reanalysis data over China[J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 2004, 25(1): 5-9. (in Chinese)
- [12] Angstrom A. Solar and terrestrial radiation [J]. Quarterly Journal of Royal Meteorological Society, 1924, 50(1): 121-125.
- [13] Prescott J A. Evaporation from a water surface in relation to solar radiation[J]. Transactions of the Royal Society of South Australia, 1940, 64(1940): 114-118.
- [14] 左大康, 王懿贤, 陈建绥. 中国地区太阳总辐射的空间分布特征[J]. 气象学报, 1963, 33(1): 78-96.
- Zuo D K, Wang Y X, Chen J S. Characteristics of the distribution of total radiation in China[J]. Acta Meteorologica Sinica, 1963, 33(1): 78-96. (in Chinese)
- [15] 翁笃鸣. 试论总辐射的气候学计算方法[J]. 气象学报, 1964, 34(3): 304-315.
- Weng D M. Discussion on the method of calculating total radiation in climatological study[J]. Acta Meteorologica Sinica, 1964, 34(3): 304-315. (in Chinese)
- [16] 王炳忠, 张富存, 李立贤. 我国的太阳能资源及其计算[J]. 太阳能学报, 1980, 1(1): 1-9.
- Wang B Z, Zhang F C, Li L X. Solar energy resources in China[J]. Acta Energetica Sinica, 1980, 1(1): 1-9. (in Chinese)
- [17] 和清华, 谢云. 我国太阳总辐射气候学计算方法研究[J]. 自然资源学报, 2010, 25(2): 308-319.
- He Q H, Xie Y. Research on the climatological calculation method of solar radiation in China[J]. Journal of Natural Resources, 2010, 25(2): 308-319. (in Chinese)
- [18] Wang C L, Yue T X. Solar radiation climatology calculation in China[J]. Journal of Resources and Ecology, 2014, 5(2): 132-138.
- [19] Yang K, Koike T, Ye B S. Improving estimation of hourly, daily, and monthly solar radiation by importing global data sets[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2006, 137(1): 43-55.
- [20] Almorox J Y, Hontoria C. Global solar radiation estimation using sunshine duration in Spain[J]. Energy Conversion and Management, 2004, 45(9): 1529-1535.
- [21] Rivington M, Matthews K B, Bellocchi G et al. Evaluating uncertainty introduced to process-based simulation model estimates by alternative sources of meteorological data[J]. Agricultural Systems, 2006, 88 (2-3): 451-471.
- [22] Chen R S, Ersi K, Yang J P et al. Validation of five global radiation models with measured daily data in China[J]. Energy Conversion and Management, 2004, 45 (11-12): 1759-1769 .
- [23] 邓艳君. 日太阳辐射分布式模型研究[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2012.
- Deng Y J. Distributed modeling of daily solar radiation [D]. Nanjing: Nanjing of Information Science and Technology, 2012. (in Chinese)
- [24] 刘可群, 陈正洪, 梁益同, 等. 日太阳总辐射推算模型[J]. 中国农业气象, 2008, 29(1): 16-19.
- Liu K Q, Chen Z H, Liang Y T, et al. Calculation model for daily global solar radiation[J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 2008, 29(1): 16-19. (in Chinese)
- [25] 杨金明, 范文义, 赵颖慧. 三个日太阳总辐射估算模型比较[J]. 应用生态学报, 2014, 25(8): 2304-2310.
- Yang J M, Fan W Y, Zhao Y H. Comparison of three daily global solar radiation models[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2014, 25(8): 2304-2310. (in Chinese)
- [26] 陶求华, 李峥嵘, 蒋福建. 基于气象和空气质量观测数据的日太阳辐射估计[J]. 集美大学学报(自然科学版), 2014, 19(5): 369-374.
- Tao Q H, Li Z R, Jiang F J. Estimation of incident daily solar radiation from meteorology and air quality observation [J]. Journal of Jimei University(Natural Science), 2014, 19(5): 369-374. (in Chinese)
- [27] 喻丽, 申双和, 陶苏林, 等. 基于空气污染指数的太阳日总辐射计算方法[J]. 应用气象学报, 2015, 26(3): 291-299.
- Yu L, Shen S H, Tao S L, et al. Daily total radiation model based on air pollution index[J]. Journal of Applied Meteorological Science, 2015, 26(3): 291-299. (in Chinese)
- [28] Zhou J, Wang Y Z, Yang G. General formula for estimation of monthly average daily global solar radiation in China[J]. Energy Conversion and Management, 2005, 46(2): 257-268 .
- [29] Allen R G, Pereira L S, Raes D, et al. Crop evapotranspiration [M]. FAO Irrigation and Drainage, 1998: 56.
- [30] 魏合理, 徐青山, 张天舒. 用 GMS-5 气象卫星遥测地面太阳总辐射[J]. 遥感学报, 2003, 7(6): 466-471.
- Wei H L, Xu Q S, Zhang T S. Observation of solar irradiance at the surface from GMS-5[J]. Journal of Remote Sensing, 2003, 7(6): 466-471. (in Chinese)
- [31] 中国气象局地面气象观测规范[M]. 北京: 气象出版社, 2003: 71-75.
- The China meteorological administration[M]. The ground meteorological observation specification[M]. Beijing: China

- Meteorological Press,2003:71-75.(in Chinese)
- [32]Jamieson P D,Porter J R,Wilson D R.A test of the computer simulation model ARC- WHEAT1 on wheat crops grown in New Zealand [J].Field Crops Research,1991,27(4):337-350.
- [33]张宇,赵四强.关于逐日太阳辐射估算方法的探讨[J].气象,1991,17(4):52-53.
Zhang Y,Zhao S Q.Discussion on the daily solar radiation estimation methods[J].Meteorological Monthly, 1991,17(4): 52-53.(in Chinese)
- [34]童成立,张文菊,汤阳,等.逐日太阳辐射的模拟计算[J].中国农业气象,2005,26(3):165-169.
Tong C L,Zhang W J,Tang Y,et al.Estimation of daily solar radiation in China[J].Chinese Journal of Agrometeorology, 2005,26(3):165-169.(in Chinese)