

文章编号 1000-5013(2004)04-0430-05

福建沿海地区太阳辐射时空变化分析

林文鹏 陈金华 王长耀

(中国科学院遥感应用研究所遥感科学国家重点实验室, 北京 100101;

华侨大学经济管理学院, 福建 泉州 362021)

摘要 借助 GIS 平台和 NOAA-AVHRR 的 CH1 和 CH2 资料,反演得到福建沿海地区地表反照率.利用 1961 ~ 2000 年累计年月平均气候资料,采用气候学方法计算福建沿海地区太阳总辐射、直接辐射、散射辐射、辐射平衡,并分析其时空变化规律.结果表明,运用遥感技术可定量反演地表反照率,结合太阳辐射计算方法,可确定各地乃至更细小网格的辐射值,精度可满足要求.这既可以弥补地区太阳辐射观测资料空缺,又可以为农业生产和科学研究提供有关辐射资源的基础数据.

关键词 GIS, NOAA-AVHRR, 太阳辐射, 地表反照率, 福建沿海地区

中图分类号 TP 79 P 407 P 44.1(257) P 208

文献标识码 A

太阳辐射能是地-气系统的主要能源和影响气候的主要因素.大气和地面接收到的太阳辐射能,对大气加热和对流、地面热状况及生物生长、人类活动、太阳能利用等,都有巨大的影响.它是重要的农业资源与立地环境条件.太阳辐射的变化对地球上生物的影响很大.探讨区域性的太阳辐射量的变化是研究资源与环境的基本问题之一.福建沿海地区太阳辐射观测站很少,资料很不完整.随着新技术特别是 GIS 与遥感的应用、辐射研究方法的进展和气候条件的变化,选取一种更准确、适合于该地区的太阳辐射计算方法和新技术手段,以确定各地乃至更细小网格的辐射值.这不仅可以弥补此地区太阳辐射观测资料空缺,还可以为农业生产和科学研究提供有关辐射资源的基础数据.

1 资料来源与处理

福建沿海地区包括福州、莆田、厦门、漳州、泉州 5 地市及其所辖的 46 个县、市,面积 $4.2 \times 10^4 \text{ km}^2$, 占全省面积 1/3.地区跨纬度(北纬)23°28' ~ 27°00', 经度(东经)116°55' ~ 120°43'.从北到南跨中亚热带和南亚热带 2 个气候带,是全省辐射资源最佳的地区.

1.1 资料来源

气候资料取自福建沿海地区 1961 ~ 2000 年气候整编资料,辐射资料由气候学方法计算得到.遥感资料由国家气象局卫星中心提供,并从 1999 年 1 月至 12 月 NOAA-AVHRR 1B 格式数据资料,选取包括该地区在内的局部地区数据资料其网格点之间的距离为 0.01° ,即地面分辨率为 1 km^2 ,为减少云的干扰,选用晴空天气下的遥感资料,每月选取 2 组数据.

1.2 数据处理与分析

(1) 太阳辐射的气候学计算方法.福建沿海地区只有福州市有长期的辐射观测资料,因此只能采用气候学计算的方法来求算太阳辐射.目前,被大家公认的太阳辐射的计算公式主要基于日照和云量两项常规观测指标来计算^[1].本文采用通用的日照百分率方法,计算福建沿海地区的太阳辐射.对计算结果

收稿日期 2004-02-24

作者简介 林文鹏(1973-),男,博士研究生,主要从事大气遥感和 GPS 气象学的研究. E-mail: linwenpeng@163.com

基金项目 国家重点基础研究发展规划基金资助项目(G2000077902);国家自然科学基金资助项目(40271086)

进行效果验证,分析其误差情况.用福建沿海地区各县、市气象台站近 40 a 整编资料(月、年日照百分率的多年平均值、当地月、年天文辐射值),代入所建立的回归方程,求出各县、市水平地面总辐射、直接辐射的月、年平均辐照度. (2) NOAA 气象卫星资料的处理. 其 AVHRR 辐射共有 5 个遥感通道. 采用通道 1 (0. 580 ~ 0. 680 μm), 2 (0. 725 ~ 1. 100 μm), 探测地表白天对太阳辐射中可见光和近红外光的反射率 P_{CHI} , P_{CH2} . 首先将 1B 格式的 NOAA-AVHRR 数据资料进行投影变换,生成等经纬网格的福建沿海区域数据. 在变换过程中,对数据资料作定标和太阳高度角订正,并完成几何纠正. 然后通过反演得到行星反照率,进而求出地表反照率. 其处理流程,如图 1 所示.

2 太阳辐射平衡各分量的计算

2.1 太阳总辐射与直接辐射和散射辐射计算

太阳总辐射、直接辐射和日照百分率关系的气候学计算公式^[1],如式(1),(2). 这是因为翁笃鸣^[2],祝昌汉^[3,4]曾就太阳辐射气候计算中的基本问题作了较全面、深入的论述. 他们论证了采用天文辐射计算总辐射及其分量的合理性. 有

$$Q = (a + bS_i) Q_0,$$

$$D = (c + dS_i) Q_0.$$

式(1),(2)中的 Q, D 为水平地面太阳总辐射、直接辐射的月、年平均辐照度 ($\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$), S_i 为各月、年的日照百分率, Q_0 为各月、年的天文辐射 ($\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$), a 和 b 为经验系数. 本文在建立计算太阳辐射的经验公式时,利用 1961 ~ 2000 年福州市历年各月、年的辐射值和日照百分率的实测值各 480 个样本,分别建立总辐射、直接辐射与日照百分率之间的相关方程. 求得经验系数和相关系数如表 1. 结果表明,各月、年的相关系数 r 均大于 $r_{0.001}$,而且大部分月的相关系数大于 0. 85. 因此可以建立总辐射、直接辐射与日照

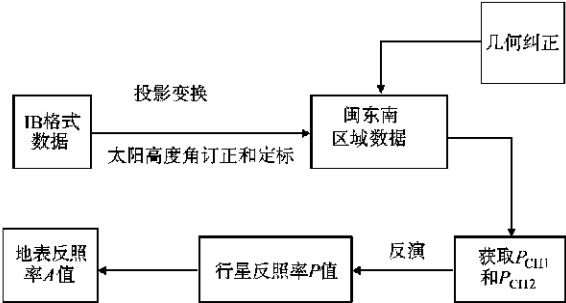


图 1 1B 数据处理流程图

表 1 福建沿海各月和年太阳总辐射与直接辐射经验系数 (a, b, c, d) 及相关系数 (r_1, r_2) 值

系数	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	年总值
a	0. 126	0. 126	0. 132	0. 125	0. 235	0. 243	0. 278	0. 216	0. 167	0. 256	0. 168	0. 154	0. 243
b	0. 700	0. 670	0. 650	0. 610	0. 630	0. 650	0. 560	0. 540	0. 610	0. 500	0. 590	0. 680	0. 570
r_1	0. 810	0. 770	0. 860	0. 820	0. 890	0. 970	0. 930	0. 910	0. 880	0. 840	0. 890	0. 710	0. 930
c	- 0. 019	- 0. 061	- 0. 143	- 0. 125	- 0. 115	- 0. 007	- 0. 201	- 0. 096	- 0. 035	- 0. 056	- 0. 031	- 0. 005	- 0. 021
d	0. 580	0. 410	0. 460	0. 530	0. 490	0. 560	0. 590	0. 450	0. 610	0. 470	0. 450	0. 480	0. 510
r_2	0. 860	0. 770	0. 690	0. 920	0. 830	0. 870	0. 950	0. 810	0. 850	0. 900	0. 860	0. 790	0. 910

百分率之间的相关方程. 为了检验这些方程是否有意义,对所有方程进行方差分析,结果计算值 F 大于 $F_{0.01}$,表明回归方程是有意义的. 为了检验用福州市的回归方程计算福建沿海太阳辐射的误差情况,我们选用与福州所在纬度相近并有地面实测数据的邻近地区南昌市进行检验. 用南昌年平均各月和年的日照百分率和当地的天文辐射值代入回归方程,求得各月和年辐射的计算值并与该地的实测值对比,计算出相对误差,结果列于表 2. 从表中可以看出,大部分月份相对误差小于 10 %. 可见,上述太阳辐射气

表 2 辐射计算的相对误差 (%)

月份	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	年总值
总辐射	7. 3	10. 7	8. 5	9. 7	4. 9	7. 3	5. 2	6. 1	5. 8	10. 6	11. 2	12. 7	4. 1
直接辐射	9. 4	12. 3	11. 4	8. 9	6. 8	8. 1	4. 1	5. 7	4. 6	9. 1	9. 3	13. 3	5. 9

候学计算公式精度较高,用其计算福建沿海各地的月、年辐射的多年平均值完全是可信的,而且是适用的. 建立了回归方程之后,把各地区各县、市气象台站的 40 a 整编资料的月、年日照百分率多年平均值,与当地的月、年天文辐射值,代入回归方程. 计算出各县、市水平地面总辐射、直接辐射的月、年平均辐照度. 再把总辐射减去直接辐射,便可得出散射辐射.

2.2 地表有效辐射的计算

地表有效辐射的计算,气候上常用布朗特公式^[6]来计算.即

$$L_n = (273 + T)^4 (0.56 - 0.08 \sqrt{e_d}) (0.01 + 0.90 S_i). \quad (3)$$

式中 L_n 为地表有效辐射, σ 为 Stefan-Boltzmann 常数, T 为摄氏温度, e_d 为实际水汽压, S_i 为日照百分率. 以上公式中的各气象要素值,取自 1961 ~ 2000 年各地区累年气候整编资料.

2.3 地表反照率的计算

地表反照率是地面辐射平衡方程中一个重要的参数.利用 NOAA-AVHRR 1B 数据资料,运用遥感技术和 GIS 技术反演,提取了平均地表反照率.以下叙述其反演方法和过程. (1) 行星反照率的反演. NOAA 气象卫星的 AVHRR 辐射计共有 5 个遥感通道.采用通道 1 (0.580 ~ 0.680 μm) 与通道 2 (0.725 ~ 1.100 μm) 探测到地表白天对太阳辐射中可见光和近红外光的反射率 P_{CHI} 和 P_{CH2} . 它们代表行星地球在相应波段内的平均反射率.由 P_{CHI} 和 P_{CH2} 反演行星反照率,考虑到现有方法具有很多的不确定性,这里直接采用了马雷乃的公式^[6]反演福建沿海地区的行星反照率.这是因为金莲姬^[7]等已运用该公式,利用 NOAA-AVHRR 遥感资料反演长江三角洲地表反照率.实验结果已表明,采用该公式计算反演行星反照率的可行性和准确性.算得

$$P = 0.432 P_{\text{CHI}} + 0.577 P_{\text{CH2}}. \quad (4)$$

(2) 行星反照率计算得到地表反照率.根据大气柱太阳辐射平衡方程,晴天行星反照率与地表反照率 A 的关系,采用的公式^[8]为

$$P = Aa + b, \quad a = Q/Q_0, \quad b = 1 - (Q + Q_b)/Q_0, \quad (5)$$

式中 Q_0 为天文辐射, Q 为地表总辐射, Q_b 为从地表到大气上界之间的整个气柱吸收的太阳辐射.这里关键是确定系数 a , b . 由前面计算得出的 Q , Q_0 值可求得系数 a , b . A 的确定采用了前人的方法^[9], 定义 $f = b/(1 - a)$, 取 $f = 0.22$, 可算出 b , 这样便可得出地表反照率 A . 在反演过程中还需剔除云的影响, 根据云的光谱反射特性,并考虑到在 CHI , CH2 . 大多数云具有较高的反照率,其经验剔除规则为^[7-10], P_{CHI} 大于 30 % 或 P_{CH2} 大于 35 %,就可初步认定为云覆盖所致而加以剔除. 这样通过遥感技术反演,可得 1999 年各月、年平均地表反照率. 由于福建沿海地区位在中亚热带南部和南亚热带,地表状况年变化不大,地表反照率的年变化也不大. 可把利用遥感方法反演得到的当年地表反照率,近似当成为历年各月、年的平均地表反照率.

2.4 地表净辐射的计算

地表辐射平衡方程为^[11]

$$R_n = Q(1 - A) - L_n, \quad (6)$$

式中 R_n 为地表净辐射, Q 为总辐射, A 为地表反照率, L_n 为地表有效辐射. 由前面计算得出的结果代入上式,便可得出地表净辐射值.

3 时空变化规律及其原因分析

3.1 太阳总辐射和直接辐射

计算结果可见,各地太阳总辐射的月平均辐照度,均以 7 月为总辐射最多月,8 月次之.自 7 月至 12 月,总辐射值逐月降低,其中以 8 月至 11 月间降低最明显.12 月至次年 2 月,总辐射值变化不大.南部多以 1 月或 2 月为最少月.自 2 月至 7 月,总辐射值逐月增大.6 月至 7 月间总辐射值增多最明显.各地太阳总辐射的年平均辐照度年际变化是在波动中呈递减趋势,而且其递减速率明显体现出由沿海城市向靠近沿海的内陆西北地区减少.各月及年总辐射的地区分布特征基本一致.以年总辐射为例,如图 2(a) 为东南向西北减小.南安、仙游一线以南总辐射年平均辐照度高于 $150 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$. 全省最高值出现在东山岛.直接辐射的月、年平均辐照度的变化规律与总辐射差不多,年平均辐照度的年际变化也是在波动中呈现逐年递减趋势.其分布的特征纬带性较明显,自南向北、自东向西减小(图 2b). 影响到达地面太阳辐射强弱变化的因素有很多.决定太阳辐射逐月变化规律的主要因素是太阳的运行规律.到达大气层顶的太阳辐射随太阳位置而变化,其月辐射量基本为定值.进入大气层后,大气分子、云量、大气中水汽及悬浮物等,对太阳辐射的吸收、反射、散射作用削弱了到达地面的太阳辐射程度.因此,到达地面的太阳

辐射并不完全遵循太阳运行规律,而是在其基础上又叠加了外在因素的影响.

3.2 散射辐射

各地散射辐射的月平均辐照度,以 12 月或 1 月为最少月,5 月,6 月为最多月.因为 12 月,1 月的闽东南各地为少雨月,云量少,大气透明度高,5 月,6 月则为多雨月.散射辐射年平均辐照度年际变化是在波动中呈递增趋势,其递增速率同样表现出由沿海城市向靠沿海内陆西北地区减少.散射辐射年平均辐照度等值线的走向接近东西向(图 2c),表现其空间分布以经向差异为主.在东西方向上分布形势呈两高一低型.即沿海半岛、岛屿,闽中大山带南段、中段为高值区.东部沿海平原的内陆地区(除半岛、岛屿外)为低值区.除沿海半岛、岛屿小面积高值区外,年平均散射辐射有随高度升高而增大的趋势.闽中大山带南段和沿海东山岛、厦门等地,散射辐射年平均辐照度超过 $80\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$.

3.3 地面有效辐射

地面有效辐射最低值多出现在 5 月或 6 月,大多数市、县地面有效辐射最多月是 10 月,少数地方为 11 月.这两个月由于云量少,使地面有效辐射值高.南部年差别较大.其年平均辐照度分布特征呈现自东南向西北减少(图 2d),高值区出现在惠安以南的沿海半岛、岛屿.

3.4 地表净辐射

地表净辐射的月、年变化与地面温度变化基本一致,7 月为各地净辐射最高值月.此后逐月减少,最低值月为 12 月.各地地表净辐射的差别南部最小,中部最大,北部次之.年平均辐照度空间分布大体自

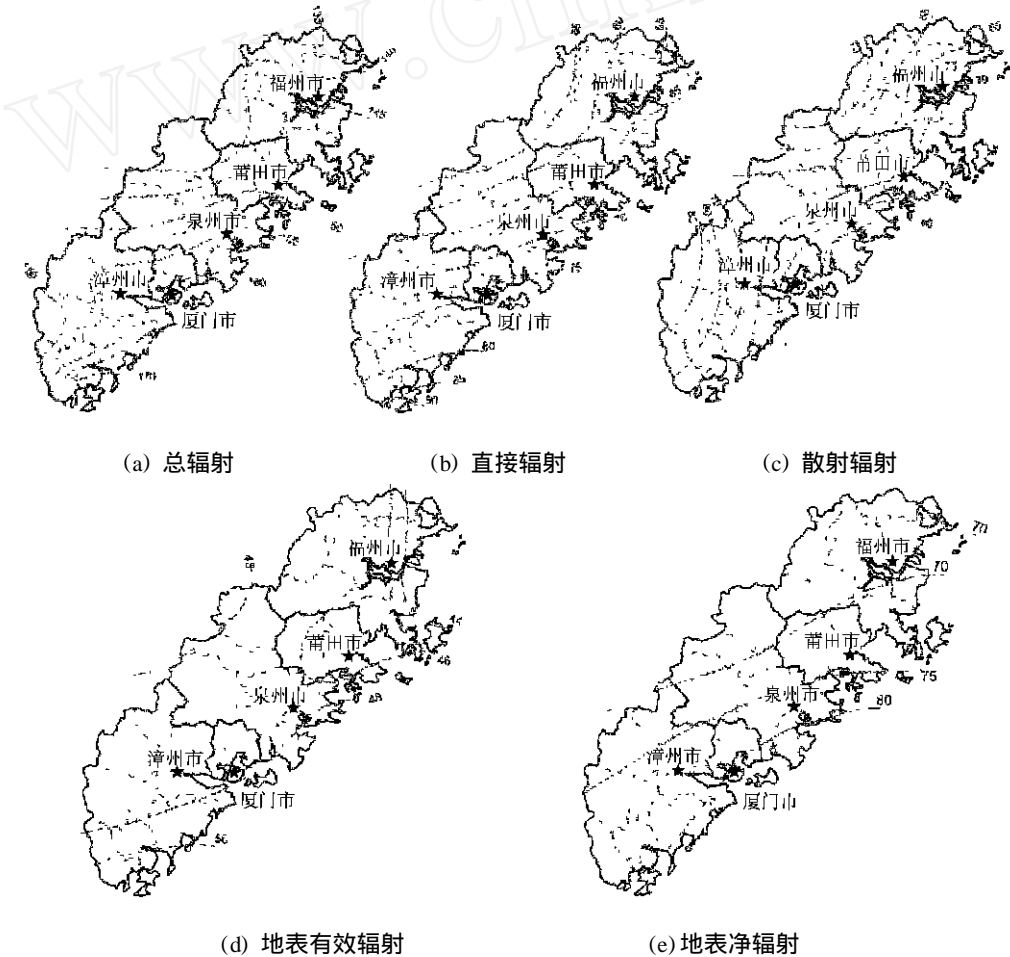


图 2 福建沿海地区太阳年平均辐照度($\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$)分布图

闽东南沿海向北减少至闽江干流及其两侧地区,自闽江干流向北其值又略增大(图 2e).

4 结束语

(1) 利用已有的辐射观测资料,采用气候学计算方法计算太阳辐射,可运用于福建沿海地区太阳辐射的计算,精度可满足要求.(2) 运用遥感技术可定量反演地表反照率,结合太阳辐射计算方法,可确

定各地乃至更细小网格的辐射值. 这样不仅可弥补地区太阳辐射观测资料空缺, 还为农业生产和科学研究提供有关辐射资源的基础数据. (3) 分析福建沿海地区太阳辐射空间分布变化表明, 城市发展已对太阳辐射产生影响. 各地太阳总辐射空间变化, 明显体现由沿海城市向靠沿海内陆西北地区减少, 而散射辐射则相反. 通过分析还可以看出, 太阳辐射年变化速率也体现出城市发展越快, 其变化速率越快的规律. 这都表明城市发展影响着太阳辐射^[11]. (4) 通过对福建沿海地区太阳辐射时间变化分析表明, 天文辐射在实际辐射中居主导位置, 但到达地面的太阳总辐射除受天文辐射的影响外, 大气层的衰减也是一重要因素. 福建沿海地区太阳总辐射、直接辐射近年来呈减少趋势, 散射辐射则呈逐年递增趋势. 其主要原因是由于大气中总悬浮微粒的增加^[12,13], 并且推测太阳总辐射仍继续呈减少趋势. (5) 太阳辐射的变化, 将会对该地区的农业生产有一定影响. 了解了太阳辐射的变化规律, 对该地区农业可持续发展, 具有一定的战略意义和指导作用.

参 考 文 献

- 1 高国栋. 气候学教程[M]. 北京: 气象出版社, 1996. 82 ~ 88
- 2 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
- 3 祝昌汉. 再论总辐射气候学计算方法(一)[J]. 南京气象学院学报, 1982, 5(1): 15 ~ 24
- 4 祝昌汉. 再论总辐射气候学计算方法(二)[J]. 南京气象学院学报, 1982, 5(2): 196 ~ 206
- 5 左大康. 地球表层辐射研究[M]. 北京: 科学出版社, 1991. 274 ~ 292
- 6 马霭乃. 遥感信息模型[M]. 北京: 北京大学出版社, 1990. 172 ~ 176
- 7 金莲姬, 李雁翎, 刘晶森等. 利用 NOAA-AVHRR 遥感资料反演长江三角洲地表反照率的实验[J]. 南京气象学院学报, 2002, 25(2): 28 ~ 34
- 8 Zhong Qiang, Li Yinhai. Satellite observation of surface albedo over the Qinghai-Xizang plateau region[J]. Adv. Atmos. Sci., 1988, 5(1): 57 ~ 65
- 9 Chen T S, Ohring G. On the relationship between clear-sky planetary and surface albedos[J]. Adv. Atmos. Sci., 1984, 41(1): 156 ~ 158
- 10 范辽生, 刘新安, 于贵瑞等. 东北地区辐射资源栅格化信息系统的建立[J]. 资源科学, 2003, 25(2): 59 ~ 65
- 11 林正云, 刘孟珠, 黄燕平等. 福州城市发展对太阳辐射的影响[J]. 太阳能学报, 1997, 18(1): 41 ~ 45
- 12 陈千盛, 池艳珍. 福州大气污染对太阳辐射等要素的影响[J]. 环境科学学报, 1998, 18(5): 557 ~ 560
- 13 刘德祥, 陈昌毓, 权天平等. 兰州空气污染对太阳辐射的影响[J]. 环境科学, 1990, 11(3): 73 ~ 78

Analysing Temporal and Spatial Variation of Solar Radiation in Coastal Areas of Fujian

Lin Wenpeng Chen Jinhua Wang Changyao

(Inst. of Remote Sensing Appl., ACS, 100101, Beijing, China;

College of Econ. Manag., Huaqiao Univ., 362021, Quanzhou, China)

Abstract With the aid of GIS platform as well as CH1 and CH2 data of NOAA-AVHRR, the surface albedo in coastal areas of Fujian can be derived by inversion. By using average climate data for months and years in succession since 1960 to 2000 and adopting climatologic method, the authors compute total solar radiation and direction radiation and scattered radiation and radiation equilibrium in coastal areas of Fujian; and analyse the regular pattern of their temporal and spatial variation. As shown by the results, by using remote sensing technology, the surface albedo can be quantitatively derived through inversion; by combining with method and means of solar radiation computation, the radiation values with satisfactory precision of various localities and even more trivial lattices can be determined. Thus not only the vacancy of observed solar radiation data in certain region can be made up, but also basic data about radiation source can be offered for agricultural production and scientific research. To understand the regular pattern on temporal and spatial variation of solar radiation is of important significance for the strategy of sustainable agricultural development in related locality.

Keywords GIS, NOAA-AVHRR, solar radiation, surface albedo, coastal areas of Fujian