

徐兴奎. 2011. 西北干旱和半干旱地区地表蒸发计算方法评估应用 [J]. 气候与环境研究, 16 (3): 329–336. Xu Xingkui. 2011. Evaluation for a method of evapotranspiration in arid and semi-arid regions of Northwest China [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 16 (3): 329–336.

西北干旱和半干旱地区地表蒸发计算方法评估应用

徐兴奎

中国科学院大气物理研究所国际气候与环境科学中心, 北京 100029

摘 要 针对我国西北地区干旱和半干旱的气候特征, 以及相对简单的地表覆盖特点, 论证了互补相关模型计算西北地区蒸发量的可行性。通过中国科学院山东禹城试验站农田观测资料, 分析了植被多样性分布对互补相关模型的影响。得出植被的多样性以及植被物候变化的非同步变化是造成互补相关模型中关键参数——大尺度平流参数季节变化的重要原因。并利用遥感反演参数和气象台站观测数据计算了覆盖类型相对单一的西北地区蒸发。结果表明, 蒸发与地表覆盖类型的空间分布一致, 与气象台站 20 cm 蒸发皿观测数据呈现空间互补特征, 其季节变化与区域降水、温度和植被物候变化相吻合。

关键词 互补相关 大尺度平流 蒸发

文章编号 1006-9585 (2011) 03-0329-08 **中图分类号** P463 **文献标识码** A

Evaluation for a Method of Evapotranspiration in Arid and Semi-arid Regions of Northwest China

XU Xingkui

International Center for Climate and Environment Sciences, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029

Abstract In view of the characteristics of the arid climate and simple land surface types in the northwest of China, Complementary Relationship Model (CRM) is discussed to evaluate its precision in calculation. By using the observational data from Yucheng experimental station which is located in Shangdong Province, the influence of vegetation diversity on CRM is analysed. The result shows that the distributions of vegetation diversity and no in-phase phenology are two important reasons that cause large-scale advection parameter, a primary parameter in CRM, to change with the seasons. At last, CRM is applied in the northwest of China. The real evapotranspiration from CRM is essentially uniform with the distribution of land surface types, and presents complementary characteristics compared with that from the 20-cm caliber evaporating dish, and similar seasonal change characteristic to precipitation, temperature, and phenology.

Key words complementary relationship, large-scale advection parameter, evapotranspiration

收稿日期 2009-12-10 收到, 2010-11-20 收到修定稿

资助项目 中国科学院创新项目 KZCX2-YW-Q03-3, 国家重点基础研究发展规划项目 2010CB951101、2009CB421402, 国家自然科学基金项目 40675047

作者简介 徐兴奎, 男, 研究员, 研究方向为遥感信息反演和气候环境应用。E-mail: xkxu@mail.iap.ac.cn

1 引言

地表蒸发量是衡量气候环境变化的重要指标,蒸发量年变化强度既能反映局地气候的改变,也能间接反映地表覆盖类型的时空变化。近年来随着全球气温的逐年上升,水资源的利用和调控都迫切需要一种能够满足气候环境研究需求的蒸发量计算方法。模型既要简单实用,而且能够保证区域尺度蒸发量的精度。

西北地区是我国水资源相对匮乏、地表覆盖类型相对简单的区域,但面积却极为广阔,经济布局以农业和畜牧业为主,水资源供需矛盾十分突出。西北地区水资源急速匮乏的原因来自两个方面:一是自然因素,20 世纪 80 年代后气温的增高,造成地表水资源加速枯竭;另一个与人为因素有关,随着人口数量和经济的快速增长,工农业用水和城镇生活用水迅速增加。以流经西北地区的黄河为例,国民经济耗水成为最主要的原因(刘涵等, 2005; 张学成等, 2005),其中农业用地的增加对地表环境影响规模最大。如黄河上游 1990 年代农田灌溉面积比 1960 年代增加 1.5 倍达到 131.5 hm^2 ,中游增加 1.7 倍达到 133.3 hm^2 ,农业用水占黄河引水量的 95% (陈霁巍和穆兴民, 2000; 刘昌明和张学成, 2004)。农业用水延缓了地表植被覆盖的退化程度的同时,在干旱日益严重的气候背景下,农业等用水的粗放使用,也造成西北地区地表实际蒸发分布发生变化。

西北地区是我国灾害性天气频发的地区。天气动力和地表覆盖特征的共同作用,使得西北地区成为沙尘天气高发区域(赵景波等, 2002; 石广玉和赵思雄, 2003)。干旱少雨,地表水匮乏是西北沙尘源地的共同特征。监测估算西北地区水分蒸发,有利于区域气候环境变化的研究,对于估算地表风蚀作用,预测沙尘频次具有重要社会意义;同时也有助于水资源的科学合理利用。

目前大多数的区域蒸发计算模型过于依赖地表覆盖特征的分布,对于人为因素造成的工农业用水和城镇生活等非自然性用水产生的蒸发,并没有得到考虑和解决,因此需要一种能够估算区域综合蒸发量的模型。作为一种大尺度的气候估算模型,互补相关模型能够满足上述需求。其优

势在于不需要过多地考虑下垫面类型,仅仅通过常规气象观测资料就可以估算区域尺度内蒸发量的季节变化。本文利用实验观测资料,在植被复杂的华北平原地区,检验论证了互补相关模型的可靠性,分析了造成互补相关模型中关键参数——大尺度平流参数变化的原因。结合卫星反演资料,将互补相关模型应用于我国西北干旱和半干旱区域,为快速及时地监测西北地区水资源利用和干旱发展提供了一种简易的估算方法。

2 计算方法

互补相关理论是基于半理论和半经验的一种蒸发量计算方法(Bouchet, 1963)。该方法的理论基础认为:在一个局地的人为创造的理想小环境中,根据它的地表蒸发变化情况,可以用来估算本地区大面积陆面或水域的实际蒸散发量。互补相关理论最初在较小尺度的农田中得到了检验和应用,但 Morton (1965, 1979, 1983) 证实,互补相关理论对于区域尺度更加准确,并将其应用到整个行星边界层中。因此互补相关模型可以计算几千平方公里面积上的蒸发。Morton (1965, 1979, 1983) 用大量的实验数据证明了局地蒸发潜力与实际蒸散发之间的互补关系确实存在,且两者成负指数关系。近年来随着全球范围辐射、云量和最大潜在蒸发的减少,气温和大气湿度却在显著的增加,互不相关理论又得到了重视,并通过互补理论解释了部分区域的气候变化成因。互不相关基本方程为:

$$E + E_{p0} = 2\alpha E_w, \quad (1)$$

其中, E 代表要计算的 actual 蒸发量; E_{p0} 为 Penman 公式计算的最大蒸发潜力; E_w 为下垫面已充分湿润,并且其上面空气湿度也已饱和时的蒸散发量,即 Penman 公式中干燥力为零时的蒸散发量; α 为大尺度平流参数。

自互补相关理论提出后,已逐渐建立了一整套完整的互补相关模型计算方法,对于湖泊、流域和单一的下垫面而言,计算精度很好。但在下垫面复杂的区域,互补相关计算方法存在一度的误差。其中大尺度平流参数 α 是影响计算误差的一个关键因素。中国西北地区地表覆盖类型虽然总体上相对单一,但在小尺度上仍然存在覆盖类

型的多样性分布，需要分析确定大尺度平流参数的影响因素。

3 下垫面多样性对计算的影响

大尺度平流参数 α 定义为 (Priestley and Taylor, 1972):

$$\alpha = \frac{E_{p0}}{E_w} \quad (2)$$

对于大尺度平流参数 α ，Priestley and Taylor (1972) 认为是一个常数，通过陆面及水面观测结果，得出 $\alpha=1.26$ 。其后研究表明， α 并不是一个常数值。McNaughton and Springgs (1989) 对 Priestley and Taylor (1972) 的结果进行敏感分析后发现 α 值波动很大，并应用 Priestley and Taylor (1972) 使用的数据重新计算发现， α 值与植被冠层阻力有很大的关系。

植被冠层阻力是一个变化极大的参量，不但与植被自身的生理特性有关，也受大气温湿和太阳辐射强度等影响，具有明显的日变化和季节变化。确定植被对大尺度平流参数的影响，选择的观测实验区域需要满足两个条件：首先区域内植被分布具有多样性；其次有满足确定大尺度平流参数所需的天气条件。本文选择植被分布复杂，季节变化强烈的华北平原作为样本区域，实验观测数据来自山东禹城综合试验站 1993~1995 年农田观测资料。通过以下条件在 3~5 月中选择近似满足互补相关理论的实验观测数据：(1) 雨过天晴之后，天气系统趋于稳定；(2) 农田已充分湿润，即中子水份仪所测得的 0~1 m 处土壤平均体积含水量大于或等于 0.30；(3) Lysimeter 值作为 E_w 的实测值。根据 (2) 式计算了 1993~1995 年 3~5 月平均大尺度平流参数 α 值 (表 1)。计算结果显示，大尺度平流参数与季节变化有关。在植被类型复杂的华北平原地区，只有 4 月份大尺

度平流参数为 1.25，接近于均一下垫面条件下的 1.26 观测值，在其它两个月份，大尺度平流参数则要小于 1.26。

大尺度平流参数季节变化的原因来自两个方面：一是植被生理因素；另一个是气候因素。从植被生理学微观角度而言，植被每个生长期叶面气孔密度不同，因而冠层阻力会存在很大的差异，导致区域范围大尺度平流参数出现季节差异。但这不足以解释当下垫面均一时大尺度平流参数近似于 1.26，因此植被冠层阻力只是影响大尺度平流参数的因素之一。造成大尺度平流参数时间波动的另一项因素与区域气候的季节变化有关。不同的季节区域内温湿等气象要素会发生变化，最大蒸发潜力有很大的差异。然而根据互补相关理论，当气象条件变化时， E_w 也要发生调整，因而在水面上能够观测到与季节变化无关的常量大尺度平流参数。事实上，大尺度平流参数近似于常数的情况基本发生在下垫面均一的条件下。此时区域内地一气之间的能量、质量和动量交换也近似均匀分布，表层大气中温湿空间差异很小。因此大尺度平流参数的季节变化受下垫面覆盖类型的多样性分布影响可能更大。植被的多样性造成同一季节各种植被却处在不同的生长期，冠层阻力空间分布不均性巨大，导致表层大气中各种物理参数不均性随之增加，水汽扩散过程和强度发生改变。

卫星观测结果间接验证，植被不均性最可能是造成大尺度平流参数季节变化的主要原因。利用 1982~2000 年 NOAA-AVHRR 卫星数据，通过波谱分析方法分析了我国植被物候季节变化。结果显示，在华北平原地区存在大范围的一年多季农业耕作区域 (图 1)。一年多季耕作的结果造成区域植被物候与自然植被物候存在明显差别，植被覆盖变化具有显著的季节不连续性特征 (图 2)。3 月份是华北平原植被开始生长的季节，但由于人工的干预，冬小麦生长要优于其它植被物种，这造成植被覆盖的不均性加大；而在 5 月份，由于冬小麦的成熟收割，植被生理特性以及下垫面性质也不同于区域内其它物种覆盖地区，植被的不均性同样增加，结果造成区域内蒸发通量空间不均性加大，大尺度平流参数在这两个月份低于均匀下垫面的 1.26。在 4 月份，冬小麦与其它植被的长势基本保持同步，因而下垫面的生理特

表 1 大尺度平流参数 (α) 计算结果

Table 1 The calculation result of large-scale advection parameter (α)

月份	样本数	α
3 月	14	1.16
4 月	7	1.25
5 月	20	1.10

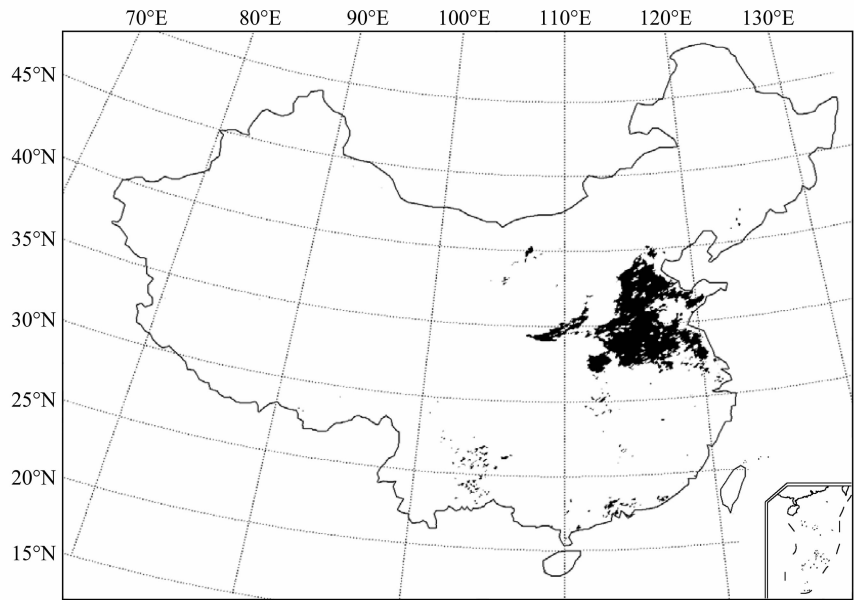


图1 20 世纪 90 年代中国一年两季耕作显著区域（通过 F 检验）面积分布
Fig.1 Distribution of two crops annually with significant F distribution during the 1990s

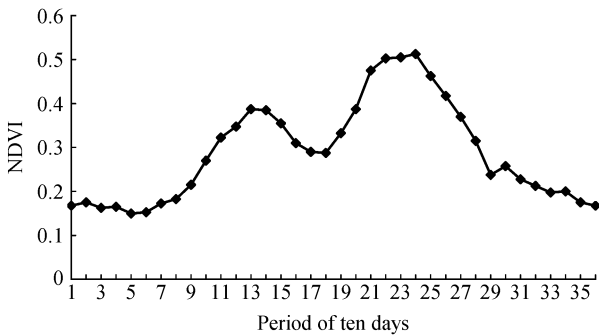


图2 一年两季耕作区域植被物候（归一化植被指数，NDVI）旬变化
Fig.2 Phenological change (Normalized Difference Vegetation Index, NDVI) every ten days in the regions of two crops annually

性和物理特征空间差异缩小，大尺度平流参数为 1.25，接近于 1.26。虽然还无法真正揭示大尺度平流季节变化的内在机制，但根据他人实验结果和本文上述观测事实可以认为，在有植被覆盖区域，下垫面物理性质差距不大的条件下，大尺度平流参数仍然可以作为一个常数使用。

4 西北地区实际蒸发计算

为了验证互补相关模型的计算精度，在保证大尺度平流参数精度的前提下，利用表 1 实验获

得的大尺度平流参数，以山东禹城生态试验站为中心计算了 1993~1995 年 3、4、5 月总蒸发量（表 2），与观测的农田蒸发对比非常接近，9 个计算值中最大误差都小于 $\pm 8\%$ ，可以满足农田蒸发估算的要求。

表 2 改进后的互补相关模式计算结果
Table 2 The calculation result of improved complementary relationship

	实测值/mm	计算值/mm	误差
1993 年 3 月	62.8410	67.6063	0.0758
1993 年 4 月	149.3779	143.8546	-0.0370
1993 年 5 月	182.4800	189.1666	0.0366
1994 年 3 月	43.8600	43.1991	-0.0151
1994 年 4 月	155.0300	155.2672	0.0015
1994 年 5 月	221.3180	235.2633	0.0630
1995 年 3 月	63.9080	58.8130	-0.0797
1995 年 4 月	134.5600	130.8416	-0.0276
1995 年 5 月	212.2250	210.2563	-0.0093

西北大部分区域处于干旱和半干旱地区，由于降水量相对较少，很难找到试验确定大尺度平流参数的实验观测数据。但相对简单的下垫面分布，恰好满足大尺度平流参数为 1.26 的条件，因此本文使用 1.26 作为计算西北地区实际蒸发的参

数。研究区域以国家气象局气候区划为准(刘光明, 1984), 包括了中温带亚干旱大区(I)、中温带干旱大区(II)和南温带干旱大区(III)。其中气象观测数据, 包括温度、湿度、气压均来自气象观测站, 同时为了保证计算精度, 太阳入射辐

射同样采用观测数据(图3)。与地表有关的反照率参数来自卫星反演的月平均值(徐兴奎和刘素红, 2002)(图4)。

计算采用了两种方式。第一种将所需的气象数据进行差分处理, 与卫星反演的 $8\text{ km} \times 8\text{ km}$ 地

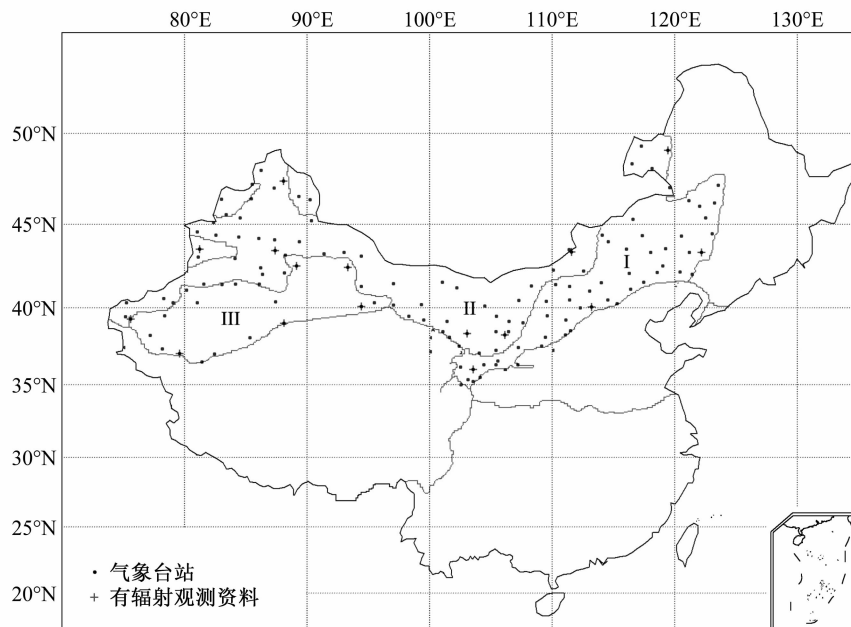


图3 西北地区气象观测站分布

Fig. 3 Distribution of weather stations in the northwest of China

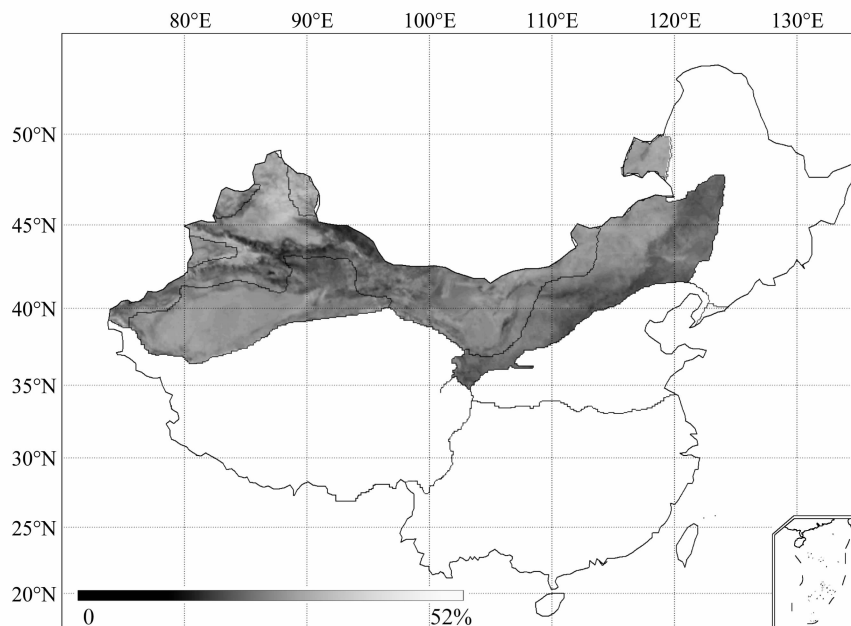


图4 1997年西北地区年平均地表反照率年分布

Fig. 4 Distribution of annual average albedo in the northwest of China in 1997

表反照率空间匹配。计算结果可以看出,蒸发量年分布能够在空间上反映出地表覆盖类型的差异(图5)。然而这种对应性并不是来自于互补相关模型本身,而是在模型中使用了遥感反演的地表反照率数据,因为反照率与地表湿度等物理属性空间分布相对应。在干旱的沙漠和荒漠区域,地表反照率相对较高,加上降水量小,因而蒸发量较低;而对于有植被覆盖的区域,土壤湿度大、反照率低,用于蒸发的能量相对较高。由于西北地区观测点稀少,定量对比检测实际蒸发量存在一定的困难,但却可以在空间分布上检验计算结果的准确性。根据互补模型的含义:区域内的最大实际蒸发量($2\alpha E_w$)是一个与地理位置和区域气候有关的极端值。当区域内地表干燥、实际蒸发量(E)减少时,最大蒸发潜力(E_p)就会上升;相反,区域内实际蒸发量增加,说明地表湿润,最大蒸发潜力就会减少。气象观测台站的20 cm蒸发皿数据近似代表了最大蒸发潜力,所以可以通过20 cm蒸发皿数据的空间分布验证实际蒸发计算结果的真实性。

气象台站观测的1997年20 cm蒸发皿年蒸发量空间分布显示,西北塔里木盆地和内蒙古中部地区是我国沙漠主要分布区域,也是沙尘等灾害

天气高频中心。干旱的气候形成了两个主要的最大蒸发潜力分布中心(图6),与之对应,这里是实际蒸发量最小的区域。相反在其它有植被覆盖或者植被覆盖率相对较高的地区,如新疆北部和内蒙古东部区域,蒸发潜力相对较低,但实际蒸发量却最高。20 cm蒸发皿数据与实际蒸发计算结果空间对应性说明,在通过卫星资料获得地表物理属性的前提下,互补相关模型能够较为准确地描述出西北地区水分蒸发的空间分布。

第二种计算方式是将整个研究区域内气象要素和卫星反演数据平均处理,这样可以消除第一种计算中数据差分造成的误差。计算结果与区域内降水和气温对比,能够反映出干旱地区3个变量的同步性变化特征(图7)。1~2月份,西北地区气温低于 0°C ,降水以固态雪为主,蒸发量很小。随着气温的上升,蒸发量逐渐上升,在3~6月期间蒸发量大于区域内降水量,原因在于期间冬季积雪和冻土融化,同时降水量相对较少,故而蒸发量大于降水。7~8月是植被主要生长季节,植被的蓄水作用以及期间降水量相对较高,实际蒸发开始小于降水。9~12月随着植被的成熟停止生长和冬季的来临,蒸发量出现等于降水量和低于降水量的现象。

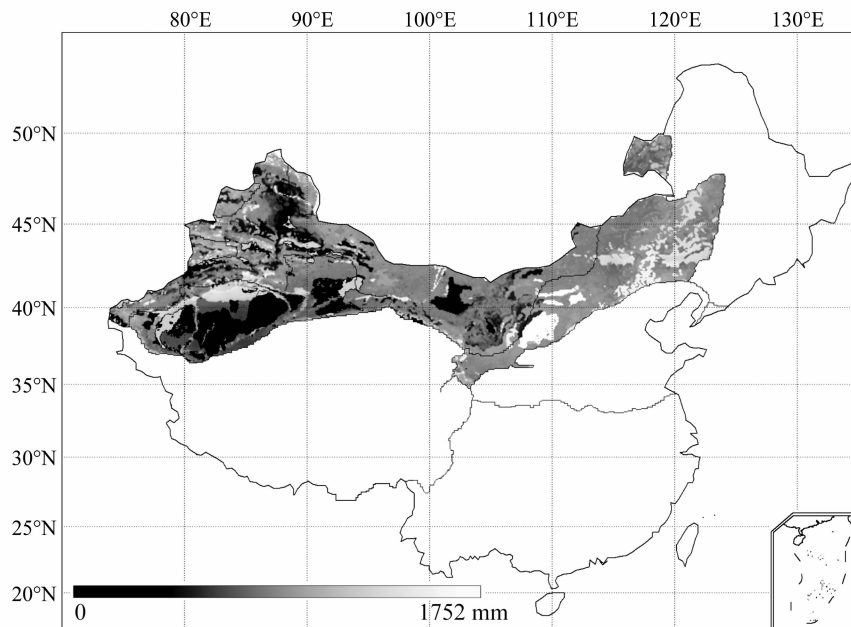


图5 1997年西北地区实际蒸发量年分布

Fig. 5 Distribution of annual evapotranspiration in the northwest of China in 1997

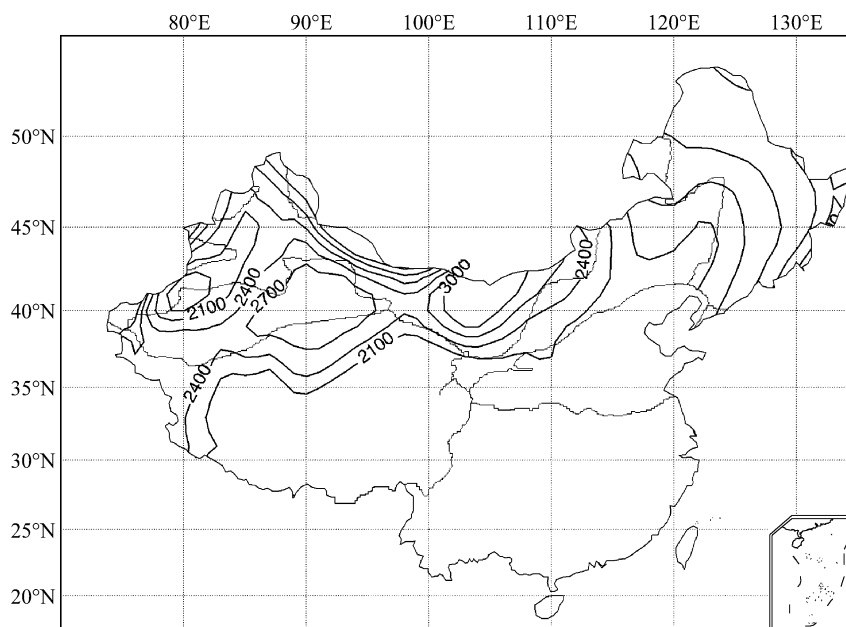


图 6 1997 年 20 cm 蒸发皿年蒸发量 (单位: mm) 分布

Fig. 6 Distribution of annual evaporation (mm) in 20-cm caliber evaporating dish in 1997

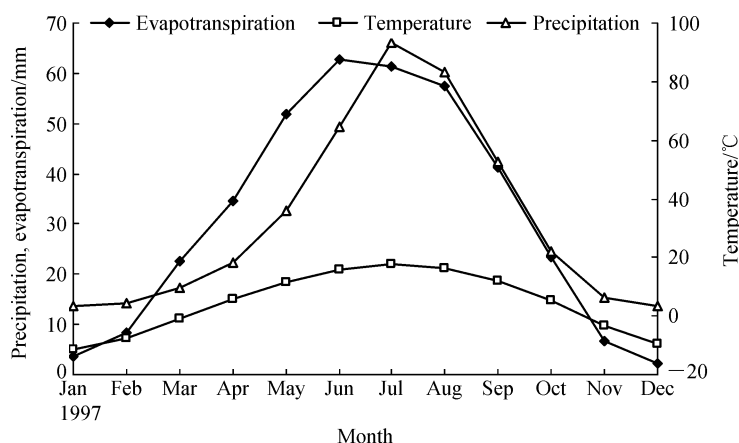


图 7 1997 年西北地区蒸发量、气温和降水月变化

Fig. 7 Monthly changes of evapotranspiration, temperature, and precipitation in 1997

5 结论及讨论

干旱和半干旱是我国西北地区主要的气候特征, 与气候环境的适应过程中, 形成了低植被覆盖率、高比率的沙漠和荒漠的陆表类型分布。区域性的气候和地表覆盖特征, 也使该地区成为我国沙尘等灾害性天气发生频率最高的区域。无论灾害性天气的治理防止、还是区域经济的发展, 都与水资源的合理利用密切相关。因此研究西北

水分蒸发具有现实的社会效益。互补相关计算方法着重于实际应用, 利用有限的数据资源和硬件资源就可以快速地分析计算区域蒸发。根据华北区域观测实验数据对互补相关模型的验证分析, 以及西北地区实际蒸发计算结果评估可以初步得出 3 点结论:

(1) 下垫面的多样性是影响互补相关模型中大尺度平流参数的重要因素之一。地表覆盖类型的多样性分布, 造成地表层大气中温湿空间分布不均, 地表层大气中物质和能量的扩散强度与均

匀下垫面不同,造成大尺度平流参数发生季节变化。

(2) 互补相关模型计算区域蒸发年变化效果会更加准确。下垫面类型的多样性造成地表物理性质出现季节性变化,其空间不均性又导致大尺度平流参数季节性波动。如果利用互补相关模型计算整个区域内年蒸发量,由于下垫面年变化的相对稳定性,大尺度平流参数也会相对稳定,计算结果会更加准确地反映真实地表蒸发状况。

(3) 互补相关模型计算结果能够反映出西北区域水分蒸发的空间分布和季节变化特征。结合遥感反演的地表反照率参数,能够更好地反映出下垫面空间性质差异对蒸发影响。

参考文献 (References)

- Bouchet R J. 1963. Evapotranspiration reellet potentielle, signification climatique [J]. Int. Assoc. Sci. Hydrol. Publ., 62: 134 - 142.
- 陈霖巍, 穆兴民. 2000. 黄河断流的态势、成因与科学对策 [J]. 自然资源学报, 15 (1): 31 - 35. Chen Jiwei, Mu Xingmin. 2000. Tendency, causes, and control measures on Yellow River dry-up [J]. Journal of Natural Resources (in Chinese), 15 (1): 31 - 35.
- 刘昌明, 张学成. 2004. 黄河干流实际来水量不断减少的成因分析 [J]. 地理学报, 59 (3): 323 - 33. Liu Changming, Zhang Xuecheng. 2004. Causal analysis on actual water flow reduction in the mainstream of the Yellow River [J]. Acta Geographica Sinica (in Chinese), 59 (3): 323 - 33.
- 刘明光. 1984. 中国自然地理图集 [M]. 北京: 地图出版社, 200pp. Liu Guangming. 1984. Compilation of China Natural Geography [M] (in Chinese). Beijing: China Cartographic Publishing House, 200pp.
- 刘涵, 黄强, 佟春生. 2005. 龙刘两库补水对黄河中下游的环境补偿影响分析 [J]. 水土保持学报, 19 (1): 145 - 148. Liu Han, Huang Qiang, Tong Chunsheng. 2005. Analysis on environment compensation of Yellow River mid-downstream by Longyangxia and Liujiaxia reservoirs regulation [J]. Journal of Soil and Water Conservation (in Chinese), 19 (1): 145 - 148.
- McNaughton K G, Spriggs T W. 1989. An evaluation of the priestley and Taylor equation and the complementary relationship using results from a mixed-layer model of the convective boundary layer [J]. Int. Assoc. Sci. Hydrol. Publ., 177: 89 - 104.
- Morton F L. 1965. Potential evaporation and river basin evaporation [J]. Journal Hydraulics Division, 91: 67 - 97.
- Morton F L. 1979. Climatological estimates of lake evaporation [J]. Water Resour. Res., 100: 81 - 92.
- Morton F L. 1983. Operational estimates of areal evapotranspiration and theirsignificance to the science and practice of Hydrology [J]. J. Hydrol., 66: 1 - 76.
- Priestley C H B, Taylor R J. 1972. On the assessment of surface heat flux and evaporation using large-scale parameter [J]. Mon. Wea. Rev., 100: 81 - 92.
- 石广玉, 赵思雄. 2003. 沙尘暴研究中的若干科学问题 [J]. 大气科学, 27 (4): 591 - 606. Shi Guangyu, Zhao Sixiong. 2003. Several scientific issues of studies on the dust storms [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 27 (4): 591 - 606.
- 徐兴奎, 刘素红. 2002. 中国地表月平均反照率的遥感反演 [J]. 气象学报, 60 (2): 215 - 220. Xu Xingkui, Liu Suhong. 2002. Deriving monthly means surface albedo of China [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 60 (2): 215 - 220.
- 张学成, 刘昌明, 李丹颖. 2005. 黄河流域地表水耗损分析 [J]. 地理学报, 60 (1): 79 - 86. Zhang Xuecheng, Liu Changming, Li Danying. 2005. Analysis on Yellow River surface runoff consumption [J]. Acta Geographica Sinica (in Chinese), 60 (1): 79 - 86.
- 赵景波, 杜娟, 黄春长. 2002. 沙尘暴发生的条件和影响因素 [J]. 干旱区研究, 19 (1): 58 - 62. Zhao Jingbo, Du Juan, Huang Chunchang. 2002. Formation conditions and affecting factors of sand dust storm [J]. Arid Zone Research (in Chinese), 19 (1): 58 - 62.