

1982~ 2001 年间中国干旱发生时空特征的遥感分析*

齐述华^{1,2,3} 牛 铮² 王军邦² 王长耀²

(1 江西师范大学鄱阳湖生态与资源利用教育部重点实验室, 南昌 330027)

(2 遥感科学国家重点实验室中国科学院遥感应用研究所, 北京 100101)

(3 中国科学院地理科学与资源研究所陆地水循环及地表过程重点实验室, 北京 100101)

摘 要 利用 1982~ 2001 年 NOAA-AVHRR 旬合成的光谱植被指数和 NOAA-AVHRR 第 4 和第 5 通道亮温计算的陆地表面温度资料, 利用水分亏缺指数(WDI)作为干旱评价指标, 分析了全国近 20 a 干旱时空分布特征, 并对近 20 a 来各月份发生干旱的频率进行了分析。提取全国雨量观测站点的水分亏缺指数和 20 a 干旱发生频次, 分析了它们与降水量的关系。研究表明: (1) 我国地域辽阔, 气候类型多样, 干旱发生具有明显的时空差异。四川盆地属于冬春旱型; 西北为常年干旱型; 黄淮海平原为春夏旱型; 西南青藏区为常年湿润型; 华南为冬春旱型; (2) 在年降水量少于 500 mm 时, 20 a 平均降水量与 20 a 平均水分亏缺指数和 20 a 总干旱发生频次都呈明显线性关系, 但在年均降水大于 500 mm 时, 水分亏缺指数及干旱发生频次与降水量关系都不显著, 表明 WDI 可以很好地评价干旱胁迫的程度, 但并不适宜评价湿润程度。

关键词 干旱; 遥感; 水分亏缺指数; 中国

中图分类号 TP75 文献标识码 A

我国地处东亚, 季风气候明显, 逐年之间季风的不稳定性造成了我国干旱的频繁发生, 使干旱成为对我国农业生产影响最严重的气象灾害。中国干旱发生的时空分布格局的研究历来受研究者的注意。有些研究^[1~4]分别利用干旱频率、降水距平百分率等指标研究中国干旱时空分布; 有的研究利用气象资料统计干旱次数和划分干旱等级, 并建立了不同时段中国干旱的时空格局^[5~10]; 潘耀忠等^[11]利用中国省级报刊自然灾害数据库分析了 1949~ 1990 年近 40 年旱灾时空分布格局特征; 王静爱等^[12]同样利用省级报刊信息源, 利用县域单元的旱灾统计信息, 重建 1949~ 2000 年中国旱灾的时空格局。这些工作基本上都是以气象资料或地方干旱统计资料为基础的。

干旱的遥感监测研究由来已久, 通常使用的干旱遥感监测模型主要有土壤真实热惯量遥感模型^[13, 14]和基于实际蒸散与潜在蒸散比值的作物水分胁迫指数模型^[15, 16]。这些物理模型机制明确, 运行时需要输入大量的辅助参数(如气象资料和土壤质地资料), 对于大面积的遥感干旱监测比较困难, 而且热惯量模型只适用于稀疏植被覆盖或无植被覆盖条件下^[5], 也

在很大程度上限制了该方法的广泛应用。

水分亏缺指数(Water Deficit Index, WDI)^[17]是以区域能量平衡原理为基础, 对作物水分胁迫系数(Crop Water Stress Index, CWSI)理论做了进一步扩展, 使 WDI 不仅可以应用于完全植被覆盖条件, 同时适用于裸地或部分植被覆盖条件下土壤水分状况评价。齐述华等^[17]在介绍 WDI 原理的基础上, 利用气象观测站点观测的表层土壤含水量对 WDI 应用于全国区域尺度干旱监测做了评价, 表明 WDI 能够合理地评价区域尺度干旱。WDI 作为一种半经验半理论干旱评价指标, 可以由遥感获取的陆地表面温度和光谱植被指数计算获取, 从技术上为分析区域范围较长时间序列干旱时空特征提供了支持, 20 多年的遥感数据集为分析干旱发生的时间格局提供数据基础。目前, 利用遥感数据分析全国范围多年干旱发生时空格局的研究还未见报道。

本文主要利用 1982~ 2001 年共 20 a NOAA AVHRR 8 km 分辨率 10 d 合成的第 4 和第 5 通道亮温计算 720 旬(20 a)的陆地表面温度, 结合归一化植被指数(Normalized Difference Vegetation Index, NDVI)

* 国家重点基础研究发展规划项目(2002CB412500)和江西师范大学博士启动基金项目资助

作者简介: 齐述华(1973~), 男, 理学博士, 现为江西师范大学地理与环境学院副教授, 主要研究方向为生态环境遥感和农业遥感。

E-mail: qishuhua11@163.com

收稿日期: 2005-04-07; 收到修改稿日期: 2005-09-20

计算全国 720 旬的水分亏缺指数, 由此分析我国干旱发生的时空分布特征。

1 水分亏缺指数简介^[17]

Moran 等^[18] 考虑到以下两个方面的原因:

(1) CWSI 的多数理论参数与植被覆盖度有近线性关系; (2) 完全植被覆盖和裸土条件下的很多属性参数相对容易获取, 以 CWSI 理论为基础, 结合光谱植被指数和陆地表面温度评价部分植被覆盖条件下土壤湿度的 VIT (Vegetation Index/Temperature) 法 (图 1)。在图 1 中的四个顶点的 F、G、D、E 分别代表冠层阻力最大郁闭冠层、冠层阻力最小郁闭冠层、湿裸地和干裸地条件下的陆气温差 ($T_s - T_a$)。Moran 等在假设陆气温差与植被覆盖度呈线性关系, 并且冠气温差、土气温差分别与植被蒸腾速率、土面蒸发速率成线性关系的前提下, 得到水分亏缺指数的计算方程为:

$$WDI = 1 - L_c/L_p = [(T_s - T_a)_{\max} - (T_s - T_a)_r] / [(T_s - T_a)_{\max} - (T_s - T_a)_{\min}] \quad (1)$$

WDI 可以由 VIT 中的线段长度的比值计算获得 (如图 1):

$$WDI = \frac{|AB|}{|AC|} \quad (2)$$

如果不存在土壤与植被之间的对流热交换 WDI 与 CWSI 相等。

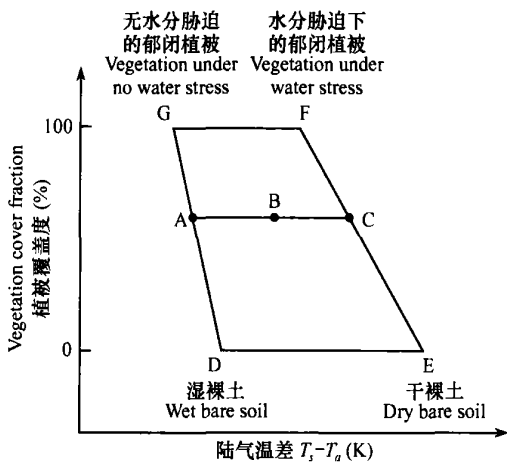


图 1 WDI 示意图解

Fig. 1 A sketch map for WDI

研究表明在大区域范围内光谱植被指数与植被覆盖度存在显著线性关系^[19], 图 1 中的植被覆盖度可以由光谱植被指数代替, 任何植被指数条件下的

最大和最小陆气温差都可以获取:

$$(T_s - T_a)_{\max} = c_0 + c_1(VI)$$

$$(T_s - T_a)_{\min} = d_0 + d_1(VI) \quad (3)$$

其中 c_0 、 c_1 、 d_0 、 d_1 分别是图 1 中线段 EF 和 DG 线性回归系数, VI 是植被指数 (Vegetation Index)。

2 数据处理

2.1 陆地表面温度

从 NASA DAAC 数据中心下载空间分辨率为 $8 \text{ km} \times 8 \text{ km}$ 的 NDVI、第 4 和第 5 波段亮温数据, 并由原始的 GOOD 投影转换到 Albers 投影。根据 Becker 等^[23] 提出的陆地表面温度反演算法, 计算陆地近 20 a 各月份每旬的陆地表面温度。具体计算方法^[24]:

$$T_s = 1.274 + \frac{T_4 + T_5}{2} \left[1 + \frac{0.1562(1 - \epsilon)}{\epsilon} - \frac{0.482 \times \Delta \epsilon}{\epsilon^2} \right] + \frac{T_4 - T_5}{2} \times \left[6.26 + \frac{3.98(1 - \epsilon)}{\epsilon} + \frac{38.33 \Delta \epsilon}{\epsilon^2} \right] \quad (4)$$

式中, T_s 为陆地表面温度; T_4 和 T_5 分别是第 4 和第 5 波段亮度温度, ϵ 为地表比辐射率, 可以由下式计算:

$$\epsilon = 1.009 + 0.047 \ln(\text{NDVI}) \quad (5)$$

$\Delta \epsilon$ 为 4、5 通道比辐射率差值:

$$\Delta \epsilon = \epsilon_4 - \epsilon_5 = 0.01019 + 0.01344 \ln(\text{NDVI}) \quad (6)$$

2.2 气温遥感获取^[22]

由于冠层叶片群体效应, 在 1 km 的空间尺度上遥感获取浓密植被陆面温度与气温近似相等^[23, 24]。根据这个原理, 利用 NDVI- T_s 空间获取气温, 计算气温空间分布模式。研究表明 NDVI- T_s 法获取气温具有一定的可行性。

2.3 水分亏缺指数

在获取陆地 NDVI 和 T_s 通道分别搜索不同 NDVI 下的最大和最小陆气温差, 由不同植被指数下最大和最小陆气温差分别拟合旱边和湿边方程, 按照式 (1) 计算 20 a 来各旬水分亏缺指数空间分布。根据农田灌溉理论, 当作物根层土壤有效含水率低于 0.4 时, 作物开始受到干旱胁迫, 作物根层土壤有效含水率在数值上等于 1 减去 CWSI^[25], 而 WDI 是 CWSI 的近似表达, 所以当 WDI 为 0.6 时, 作物开始受到干旱胁迫, 但此时并不会对作物生长产生负面

影响。在这里以 $WDI > 0.7$ 作为干旱发生阈值, 以每个像素点在 1982~ 2001 年 720 旬内发生干旱的旬数作为干旱发生频次进行统计分析。

3 结果与讨论

3.1 水分亏缺指数月平均分布

将 20 a 共 720 旬的水分亏缺指数按月份进行组

织, 每个月份 20 a 累计有 60 旬(3 旬×20)的数据, 求各月 60 旬的平均水分亏缺指数(图 2)。从图 2 可以看出不同地理位置在不同季节的平均干湿状况, 如果以 WDI 为 0.7 作为干旱区分界, 只有新疆塔里木盆地和柴达木盆地属于常年干旱地区, 在华南部分地区春季干旱也比较严重, 四川盆地在冬季也偏旱。各月平均水分亏缺指数分布图除了能够反映常年干旱的地区外, 掩盖了很多地区干旱频繁发生的实际情况。

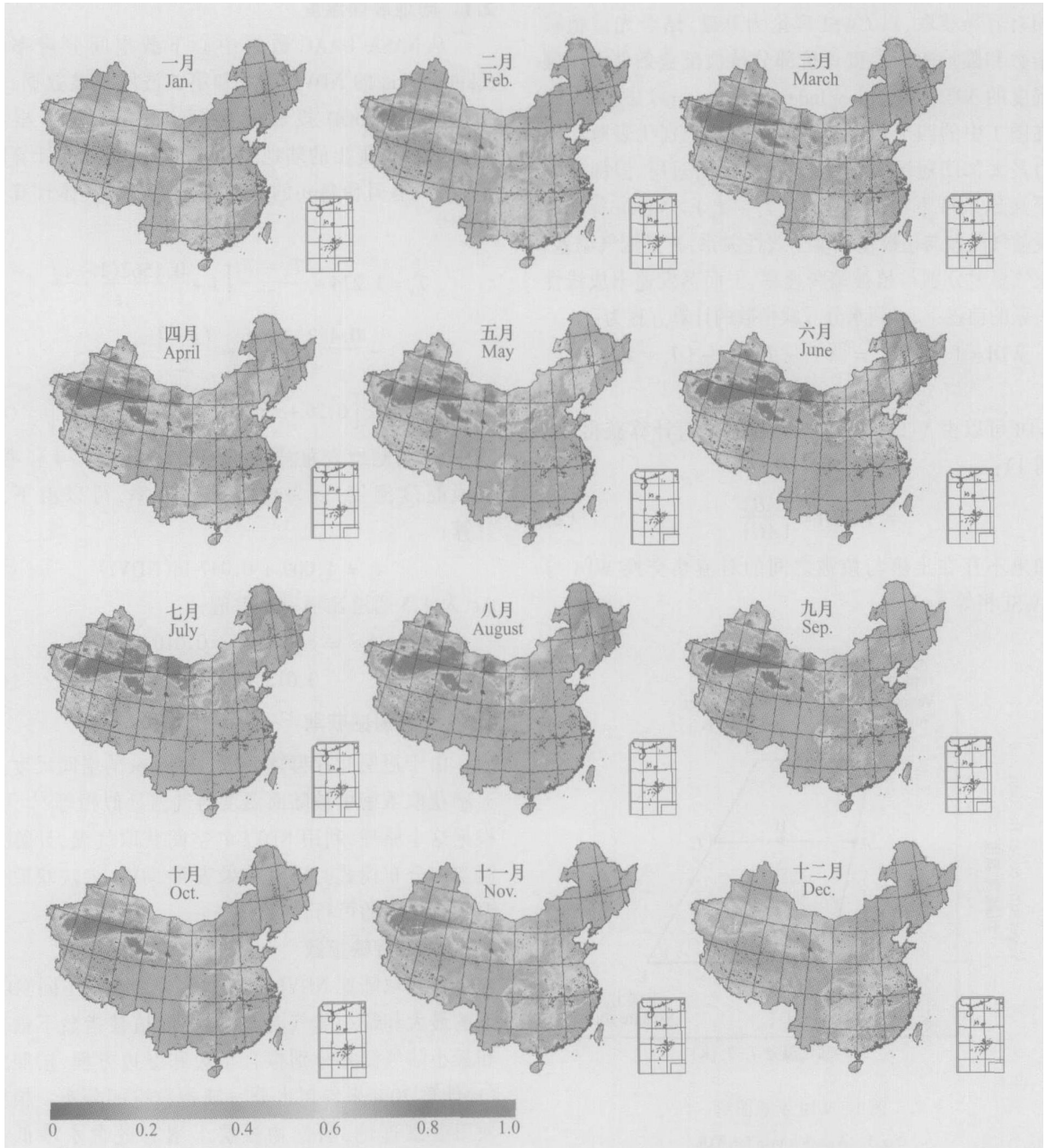


图 2 全国各月份近 20 a 平均 WDI 空间分布图

Fig 2 Spatial distribution of WDI for each month based on averages of the 20 years in China

3.2 干旱发生频次分析

以 $WDI > 0.7$ 作为判断干旱发生的标准, 分别统计在 1982~ 2001 年的 20 a 中每个月(60 旬) 发生干旱的旬数(图 3), 以此作为 1982~ 2001 年干旱发生频次。从各月干旱发生频次图可以直观地表达出近 20 a 来全国范围内在不同季节各地区发生干旱频率。从图 3 可以看出在春季, 西北地区、华北

平原和华南大部分地区的干旱发生频率都比较高; 在 5~ 8 月份, 高频率干旱发生地区就主要集中在西北和华北平原地区; 9~ 12 月份干旱发生高频率地区主要在西北、华北、华中和四川盆地等地。四川盆地属于冬春旱型; 西北为常年干旱型; 黄淮海平原为春夏旱型; 西南青藏区为常年湿润型; 华南为冬春旱型。

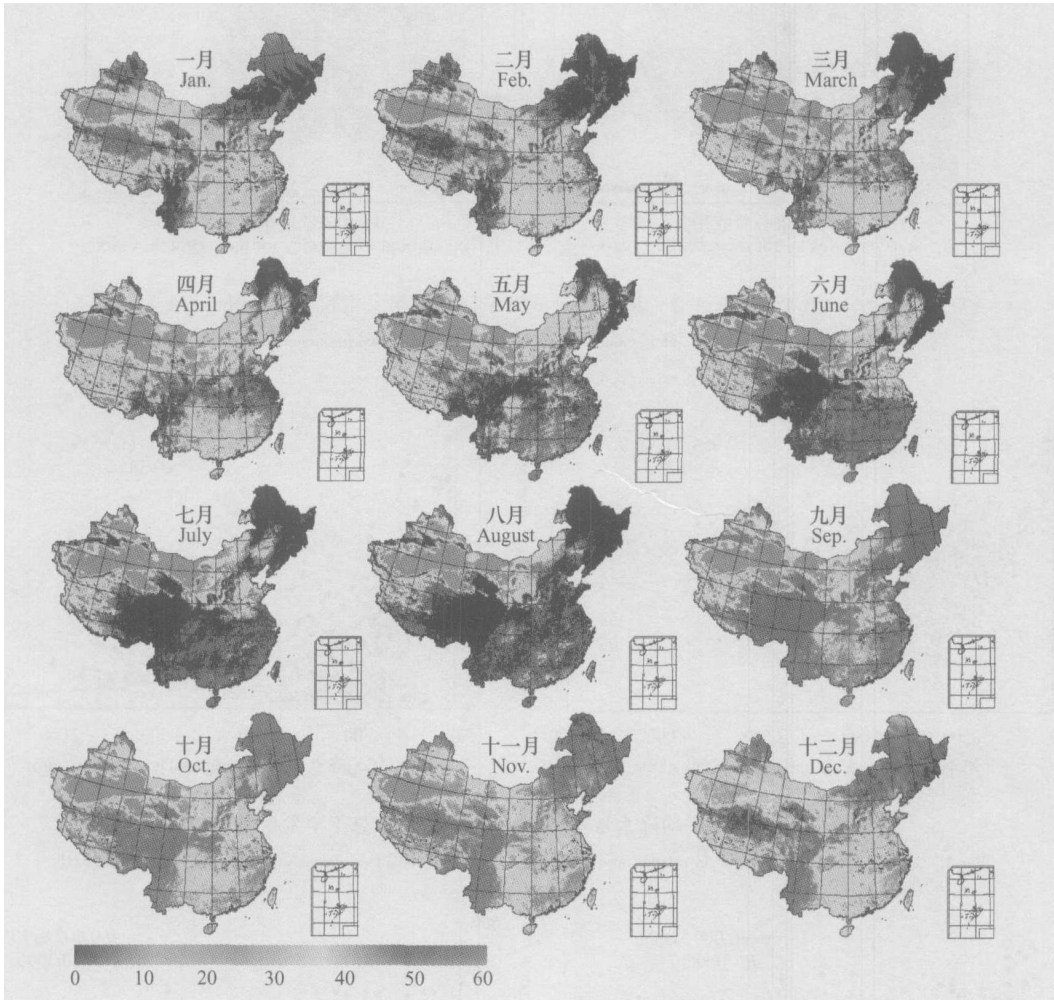


图 3 全国 1982~ 2001 年各月干旱发生频次空间分布

Fig 3 Spatial distribution of drought occurrence frequency of each month in China during 1982~ 2001

3.3 WDI 与降水关系分析

图 4a 是我国 1982~ 2001 年共 720 旬平均 WDI 图, 从图 4a 除了可以直观地发现西北干旱区具有较高的 WDI 平均值之外, 大部分地区 WDI 空间分异不明显; 图 4b 是我国干旱发生的总频率分布空间, 由图 4b 看出干旱发生高频区主要分布在西北干旱区、华北平原、四川盆地、东北平原地区以及部分西部青藏高原。

利用全国降水观测资料统计分析 1982~ 2001

年间年均降水量与平均水分亏缺指数、总干旱发生频次的关系(图 5)。从图 5 可以看出总体上年均降水与 WDI、干旱频次分别呈负对数关系; 在少于 500 mm 的低降水量条件下, 20 a 来平均 WDI、干旱发生频率随着降水量的增加而迅速减少, 与年均降水量的线性关系明显, 但在高降水量条件下, 反映干旱程度的水分亏缺指数和干旱发生频次与降水量的关系很不明朗。这表明: 在少于 500 mm 的低降水量条件下, 降水量决定了干旱程度的大小; 在降水量较高的

地区, 决定干旱发生的因子不只是降水, 其他影响区域能量和水分平衡的因子都会影响干旱的发生, 从而影响区域干湿状况; 同时, 随着降水量的增加, 产

生地表径流的或地下水径流损失的水分也会增加, 这部分损失的水量也是引起平均 WDI 不随降水量增加而减小的原因之一。

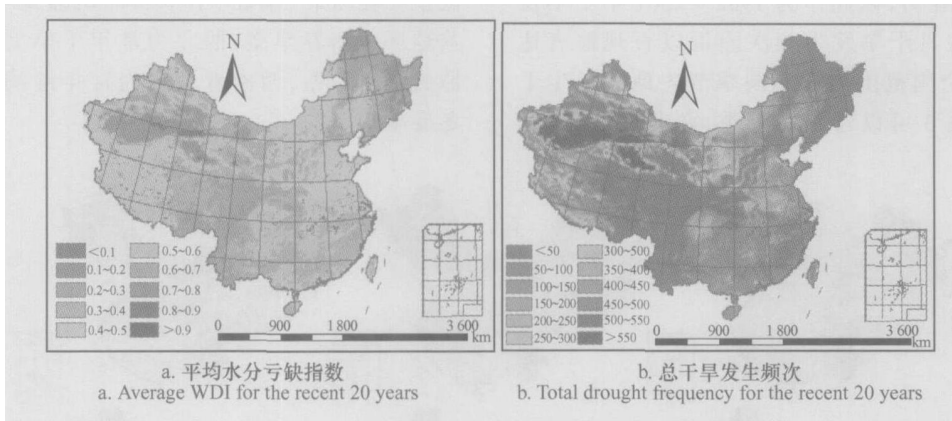


图 4 全国 1982~ 2001 年均 WDI 空间和干旱发生频次分布图

Fig 4 Spatial distribution of average annual WDI and drought occurrence frequency during 1982~ 2001

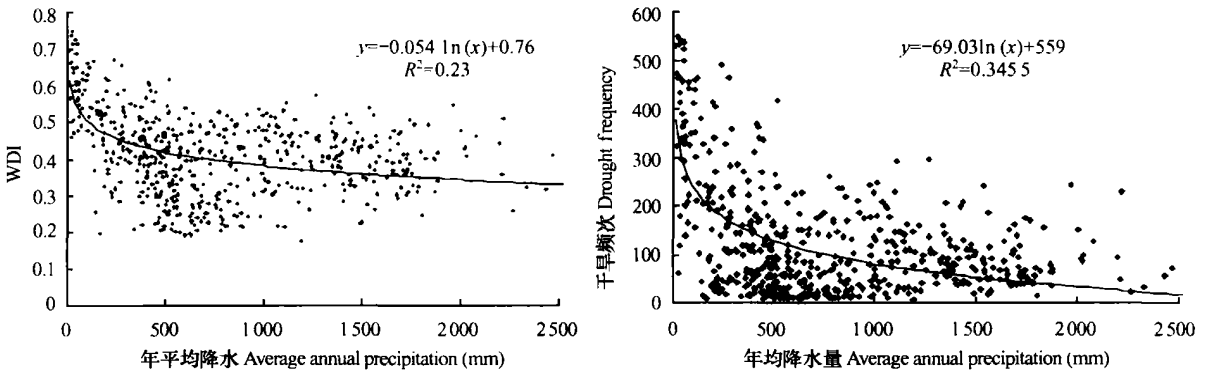


图 5 1982~ 2001 年平均降水量与平均水分亏缺指数、总干旱发生频次关系图

Fig 5 Average yearly precipitation in relation to average WDI and total drought occurrence frequency during 1982~ 2001

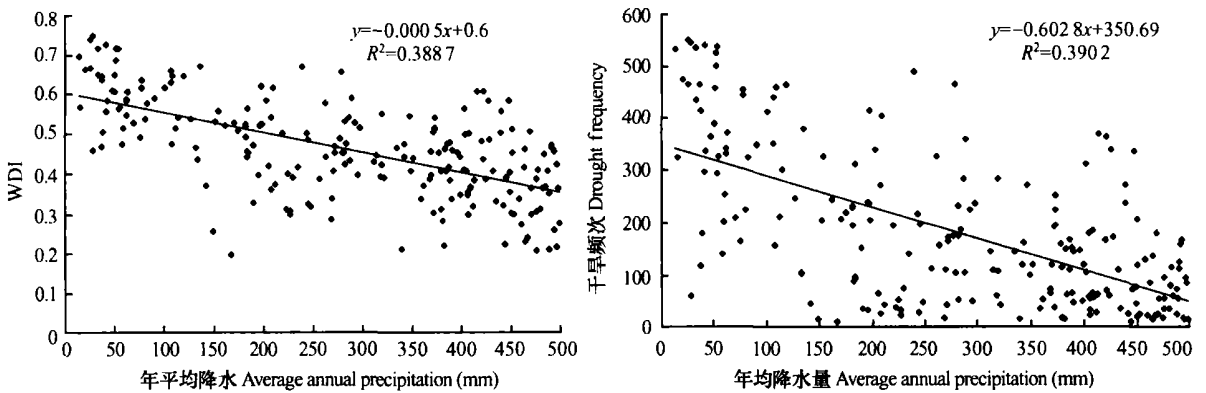


图 6 1982~ 2001 年低降水站点 (< 500 mm) 平均降水量与平均水分亏缺指数、总干旱发生频次关系图

Fig. 6 Relationship of average yearly precipitation with average WDI and total drought occurrence frequency, respectively, at stations with average yearly precipitation less than 500 mm during 1982~ 2001

4 结 论

本文利用 1982~ 2001 年 NOAA-AVHRR 的旬合成 NDVI 和 NOAA-AVHRR 第 4、5 通道亮温数据集计算的旬陆地表面温度, 以水分亏缺指数(WDI) 作为干旱评价指标, 分析了全国近 20 a 干旱发生时空分布特征, 并对 1982~ 2001 年间各月份发生干旱的频次进行了分析, 并分析了降水量与水分亏缺指数、干旱发生频次之间关系。结果表明: (1) 在春季, 西北地区、华北平原和华南大部分地区的干旱发生频率都比较高; 在 5~ 8 月份, 高频率干旱发生地区就主要集中在西北和华北平原地区; 9~ 12 月份干旱发生高频率地区主要在西北、华北、华中和四川盆地等地; (2) 四川盆地属于冬春旱型; 西北为常年干旱型; 黄淮海平原为春夏旱型; 西南青藏区为常年湿润型; 华南为冬春旱型; (3) 在年降水量少于 500 mm 时, 20 a 平均降水量与 20 a 平均水分亏缺指数、总干旱发生频次都呈显著线性关系, 随着降水量的降低, 干旱发生频次显著增加, 平均水分亏缺指数也显著上升, 但在年均降水大于 500 mm 时, 水分亏缺指数及干旱发生频次与降水量关系都不明显。

参 考 文 献

- [1] 陈菊英. 中国旱涝的分析和长期预报研究. 北京: 农业出版社, 1991. Chen J Y. Analysis and Long-term Forecast of Drought and Flood in China (In Chinese). Beijing: Agricultural Press, 1991
- [2] 马宗晋. 中国重大自然灾害及减灾对策(总论). 北京: 科学出版社, 1994. Ma Z J. The Severe Natural Calamity in China and the Countermeasure for Reducing Disaster Lose (pandect) (In Chinese). Beijing: Science Press, 1994
- [3] 王劲峰, 等. 中国自然灾害区划. 北京: 中国科技出版社, 1995. Wang J F, *et al.* The Regionalization of Natural Calamity for China (In Chinese). Beijing: China Science and Technological Press, 1995
- [4] 李克让, 尹思明, 沙万英. 中国现代干旱灾害的时空特征. 地理研究, 1996, 15(3): 6~ 15. Li K R, Yin S M, Sha W Y. Characters of time-space of recent drought in China (In Chinese). Geographical Research, 1996, 15(3): 6~ 15
- [5] 李茂松, 李森, 李育慧. 中国近 50 年旱灾灾情分析. 中国农业气象, 2003, 24(1): 7~ 10. Li M S, Li S, Li Y H. Studies on drought in the past 50 years in China (In Chinese). China Agrometeorology, 2003, 24(1): 7~ 10
- [6] 张养才, 何维勋, 李世奎, 等. 中国农业气象灾害概述. 北京: 气象出版社, 1991. Zhang Y C, He W X, Li S K, *et al.* The Summarization of Agrometeorological Calamity in China (In Chinese). Beijing: Meteorological Press, 1991
- [7] 范宝俊. 灾害管理文库(第一卷). 北京: 当代中国出版社, 1999. Fan B J. Library of Calamity Management (Vol. 1) (In Chinese). Beijing: Modern China Press, 1999
- [8] 张家诚, 周魁一, 杨华庭, 等. 中国气象、洪涝、海洋灾害. 长沙: 湖南人民出版社, 1998. Zhang J C, Zhou K Y, Yang H T, *et al.* The Meteorological, Flood and Oceanic Calamity in China (In Chinese). Changsha: Hunan People Press, 1998
- [9] 张海仑. 中国水旱灾害. 北京: 中国水利水电出版社, 1997. Zhang H L. The Flood and Drought Calamity in China (In Chinese). Beijing: China Water Conservancy and Electricity Press, 1997
- [10] 黄荣辉, 郭其蕴, 孙安健. 中国气候灾害分布图. 北京: 海洋出版社, 1997. Huang R H, Guo Q Y, Sun A J. The Climatic Calamity Distribution Map for China (In Chinese). Beijing: Oceanic Press, 1997
- [11] 潘耀忠, 龚道溢, 王平, 等. 中国近 40 年旱灾时空格局分析. 北京师范大学学报(自然科学版), 1996, 32(1): 138~ 142. Pan Y Z, Gong D Y, Wang P, *et al.* A research on temporal-spatial characteristics of drought in China during 1949~ 1990 (In Chinese). Journal of Beijing Normal University (Natural Science Version), 1996, 32(1): 138~ 142
- [12] 王静爱, 孙恒, 徐伟, 等. 近 50 年中国旱灾的时空变化, 自然灾害学报, 2002, 11(2): 1~ 6. Wang J A, Sun H, Xu W, *et al.* Spatio-temporal change of drought disaster in China in recent fifty years (In Chinese). Journal of Natural Disasters, 2002, 11(2): 1~ 6
- [13] 张仁华. 土壤含水量的热惯量模型及其应用. 科学通报, 1991, 36(12): 924~ 927. Zhang R H. Inertia model of soil moisture and its application (In Chinese). Chinese Science Bulletin, 1991, 36(12): 924~ 927
- [14] Xue Y, Cracknell A P. Advanced thermal inertial modeling. Int. J. Remote Sensing, 1995, 16(3): 431~ 446
- [15] 隋洪智, 田国良, 李付琴. 农田蒸散双层模型及其在干旱遥感监测中的应用. 遥感学报, 1997, 1(3): 220~ 224. Sui H Z, Tian G L, Li F Q. The application of a dual-layer evapotranspiration modeling in drought monitoring with remote sensing (In Chinese). Journal of Remote Sensing, 1997, 1(3): 220~ 224
- [16] 申广荣, 田国良. 基于 GIS 的黄淮海平原旱灾遥感监测研究作物缺水指数模型的实现. 生态学报, 2000, 20(2): 224~ 228. Shen G R, Tian G L. Remote sensing monitoring of drought in Huanghe, Huaihe and Haihe Plain based on GIS—calculation of crop water stress index model (In Chinese). Acta Ecologica Sinica, 2000, 20(2): 224~ 228
- [17] 齐述华, 张源沛, 牛铮, 等. 水分亏缺指数在全国干旱遥感监测中的应用研究. 土壤学报, 2005, 42(3): 367~ 372. Qi S H, Zhang Y P, Niu Z, *et al.* Application of water deficit index in drought monitoring in China with remote sensing (In Chinese). Acta Pedologica Sinica, 2005, 42(3): 367~ 372
- [18] Moran M S, Clarke T R, Inoue Y, *et al.* Estimating crop water deficit using the relation between surface-air temperature and spectral vegetation index. Remote Sensing of Environment, 1994(49): 246~ 263
- [19] Huete A R, Jackson R D. Soil and atmosphere influence on the spectra of partial canopies. Remote Sensing of Environment, 1988(25): 89~ 105

- [20] Becker F, Li Z L. Towards a local split window method over land surface temperature. *Int. J. Remote Sens.*, 1990, 11(3): 369~ 393
- [21] 延昊, 王长耀, 牛铮. 利用遥感与常规资料对比研究中国地面温度变化. *气候与环境研究*, 2001, 6(4): 448~ 455. Yan H, Wang C Y, Niu Z. Comparative studies of China temperature change by using remote sensing and traditional data (In Chinese). *Climatic and Environment Research*, 2001, 6(4): 448~ 455
- [22] 齐述华, 王军邦, 王长耀, 等. 利用 MODIS 遥感影像获取近地层气温的方法研究. *遥感学报*, 2005, 9(5): 570~ 575. Qi S H, Wang J B, Wang C Y, *et al.* Study on the estimation of air temperature from MODIS data (In Chinese). *Journal of Remote Sensing*, 2005, 9(5): 570~ 575
- [23] Nemani R R, Running S W. Estimation of regional surface resistance to evapotranspiration from NDVI and thermal IR AVHRR data. *Journal of Applied Meteorology*, 1989, 28(4): 276~ 283
- [24] Carlson T N, Gillies R R, Perry E M. A method to make use of thermal infrared temperature and NDVI measurements to infer soil water content and fractional vegetation cover. *Remote Sens. Rev.*, 1994 (52): 45~ 59
- [25] 张振华, 蔡焕杰, 杨润亚. 基于 CWSI 和土壤水分修正系数的冬小麦田土壤汗水量估算. *土壤学报*, 2005, 42(3): 373~ 378. Zhang Z H, Cai H J, Yang R Y. Estimation of soil moisture of winter field based on CWSI and soil water correction coefficient (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2005, 42(3): 373~ 378

STUDY ON THE SPATIO-TEMPORAL CHARACTERISTICS OF DROUGHT IN CHINA WITH REMOTE SENSING DURING 1982~ 2001

Qi Shuhua^{1,2,3} Niu Zheng² Wang Junbang² Wang Changyao²

(1 *The Key Lab of Poyang Lake Ecological Environment and Resource Development, Jiangxi Normal University, Nanchang 330027, China*)

(2 *State Key Laboratory of Remote Sensing Science, Jointly Sponsored by the Institute of Remote Sensing Applications of Chinese Academy of Sciences and Beijing Normal University, Beijing 100101, China*)

(3 *The key Lab of Water Cycle and Related land Surface Processes, Institute of Geographic Science and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China*)

Abstract Based on the land surface temperature data figured out of the composite data of channel 4 and channel 5 light temperature of NOAA-AVHRR, together with spectrum vegetation indices, water deficit index (WDI) was estimated as the indicator of drought. The spatio-temporal characteristics of droughts and drought occurrence frequency of each month in China in the past two decades (1982~ 2001) were analyzed. Results showed that in spring, Northwest China, North China and South China had a higher drought occurrence frequency; from May to August, Northwest China and North China had; and from September to December, Northwest China, North China, Central China and Sichuan basin had. The analysis of relationship between average annual precipitation and average WDI, drought occurrence frequency in the 20 years demonstrated that they were closely related in a linear pattern when the average annual precipitation was less than 500 mm but when the average yearly precipitation was more than 500 mm, WDI was not distinctly related to precipitation and drought level.

Key words Drought; Remote sensing; Water deficit index; China