

黄河流域干燥度时空格局变化研究

史建国^{1,2}, 张燕卿¹, 何文清¹, 刘 勤¹

(1. 中国农业科学院农业环境与可持续发展研究所, 北京 100081; 2. 包头轻工职业技术学院, 内蒙古 包头 014045)

摘 要: 根据国家气象局整编的 1957~2001 年(45 a)黄河流域 93 个气象站点气象资料, 应用 1998 年 FAO 最新推荐的 Penman—Monteith 法计算干燥度中的潜在蒸散项, 并在此基础上使用克里格(kriging)插值法生成黄河流域干燥度的分布图。研究结果显示, 黄河流域多年平均干燥度空间分布格局受气候、地形地貌等多种因素的影响, 具有明显的地域性差异, 干燥度总的特点是北大南小, 呈现由北向南逐渐递减趋势; 从时间尺度上看, 自 1957 年以来, 干燥度总体上呈波动增大趋势, 干燥度季节变化为冬季>春季>秋季>夏季, 全年以 7~9 月份干燥度最小, 11 月~翌年 3 月最大, 且不同区域之间存在着明显的差异。

关键词: 黄河流域; 干燥度; Penman—Monteith 法; 时空格局; 克里格法

中图分类号: S161.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-7601(2009)01-0242-06

干旱是世界上许多国家和地区的主要自然灾害之一, 中国受旱灾危害更为严重, 尤其是黄河流域面临的干旱问题尤为突出。因此, 加强干旱灾害的研究, 进行干旱预测对合理和节约用水, 缓解水资源的供需矛盾具有重要意义。干旱指数是干旱预测中的关键参数, 是反映干旱成因和程度的量度, 监测干旱发展过程, 定量确定某一时段旱度及范围的手段和工具。它是干旱研究的一项很重要的基础性工作。由于干旱涉及大量的不同学科, 而且在不同地理和时间上的分布以及影响的范围等使得提出一个描述干旱的定义和度量它的指数相当困难。有许多表述干旱的指数, 它们都局限于特定学科、特定的区域应用。同时干旱灾害的发生有很多不确定因素, 这使得干旱指数的确定非常困难, 量化干旱并实时有效地对干旱进行准确监测和预报更为不易。随着 FAO 最新推荐的 Penman—Monteith 法计算潜在蒸散的应用^[1~3], 在国内外再次掀起干燥度热。由于潜在蒸散方法的改进从而使干燥度更具有较充分的理论依据和较高的计算精度。本文应用于干燥度模型进行干旱预测时用特定点的测定值代表其周围区域, 并假定这些区域为均匀的。因黄河流域地区干旱时空结构变化和水资源一直是一个研究的热点问题^[4~6], 本文以黄河流域为研究对象, 应用 FAO 最新推荐的 Penman—Monteith 法计算该流域干燥度, 利用 ArcGIS 软件生成近似均匀气象条件和相近高

程下单一均匀区域的干燥度分布图, 在此基础上分析干燥度的时空分布规律, 为进一步准确地预测黄河流域作物布局和耕作制度安排提供依据。

1 研究区概况

黄河是我国第二大河, 流经九个省(区), 黄河流域幅员辽阔, 面积 79.5 万 km², 位于 95°53′~119°05′E, 32°10′~41°50′N, 地形地貌差别很大。从西到东横跨青藏高原、内蒙古高原、黄土高原和黄淮海平原四个地貌单元。黄河流域全流域多年平均降水量 456 mm, 年降水总量约 3 630×10⁸ m³; 气温分布地区差异较大, 垂直变化明显, 多年平均气温介于-3.94~14.68℃。气温的地区分布特点是由南向北、由东向西逐渐降低, 气温年际变化较大; 蒸发能力强。

黄河流域的农业对整个国民经济发展具有举足轻重的作用, 2002 年黄河流域约有耕地面积 1.500×10⁷ hm², 所涉及的 9 个省(区)粮食作物总播种面积约占全国粮食作物总播种面积的 35.7%, 粮食总产量约占全国粮食总产量的 33.1%。

2 研究方法与数据来源

2.1 研究方法

(1) 干燥度(K)的计算方法
潜在蒸散量(ET_0)与降水量(P)之比即干燥度(K), 计算公式如下:

收稿日期: 2007-07-17
基金项目: “十一五”国家科技支撑计划项目“农田水分生产潜力及适度开发研究”(2006BAD29B01); “十一五”国家 863 项目“山西半干旱区现代节水农业技术与集成”(2006AA100220); “十一五”国家科技基础性工作专项(2007FY120100) Challenge Program on Water & Food “Conservation agriculture for the dry-land areas of the Yellow River Basin”; 农业部“保护性耕作对地力及作物生长影响的机理研究”
作者简介: 史建国(1982—), 男, 内蒙古乌兰察布市人, 硕士研究生, 主要从事水资源高效利用方面研究。E-mail: shijianguo2004@163.com。
(C)1994-2022, China Academic Electronic Journal Service. All rights reserved. http://www.cnki.net

$$K = ET_0 / P$$

其中, ET_0 采用 FAO 推荐的 Penman — Monteith 公式计算, 公式如下:

$$ET_0 = \frac{0.408 \Delta (R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} U_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma (1 + 0.34 U_2)}$$

式中: ET_0 为潜在蒸散量; R_n 为作物表面净辐射量; G 为土壤热通量; Δ 为饱和水汽压与温度关系曲线的斜率; γ 为湿度计常数; T 为空气平均温度; U_2 为在地面以上 2 m 高处的风速; e_s 为空气饱和水汽压; e_a 为空气实际水压。

表 1 干燥度 K 值等级

Table 1 Arid index grade

干旱主区 Arid zone	干燥度 K 值范围 Range of K	干旱亚区 Subarid zone	干燥度 K 值范围 Range of K
湿润区 Humid (I)	$K < 1.0$	极湿润亚区(IA) Very high humid	$K < 0.45$
		湿润亚区(IB) Humid	$0.45 \leq K < 1.0$
半湿润区 Semi humid (II)	$1.0 \leq K < 3.5$	半湿润亚区(II A) Semi humid	$1.0 \leq K < 2.7$
		半干旱亚区(II B) Semiarid	$2.7 \leq K < 3.5$
干旱区 Arid (III)	$K \geq 3.5$	干旱亚区(III A) Subarid	$3.5 \leq K < 16.0$
		极干旱亚区(III B) Very high arid	$K \geq 16.0$

(2) 空间数据的插值方法

克里格法 (Kriging) 也称空间局部估计或空间局部插值, 是地统计学两大主要内容之一。其实质是利用区域化变量的原始数据和变异函数的结构特点, 对未采样点的区域化变量的取值进行线性无偏最优估计的一种方法。具体地讲, 它是根据待估样点(或待估块段)有限邻域内若干已测定的样点数据, 在认真考虑了样点的形状、大小和空间相互位置关系, 它们与待估样点相互空间位置关系, 以及变异函数提供的结构信息之后, 对该待估样点值进行的一种线性无偏最优估计。Kriging 方法对于未观测点处的估值是优越的, 它较普通平均法的估值精度高。并且避免系统误差的出现, 给出估计误差和精度, 这些是 Kriging 法的最大优点。Kriging 法制图提供了从二维平面上描述气象要素、土壤物理属性、土壤水分等要素的空间分布特征的一个有效工具, 因而被广泛使用^[7,8]。

利用 Kriging 法计算待估样点的内插值用公式表示为:

$$Z = \sum_i W_i Z_i$$

其中: n 是邻域内有效样点的个数; W_i 是邻域内有效样点 p_i 的权重系数; Z_i 是样点的实测值。空间内插的估计方差反映了取样本身的变异以及空间内插所用分群样点内在的不确定性, 其计算公式为:

其中计算净辐射 R_n 的经验系数依据刘钰等^[4] 计算所得, 其计算公式:

$$R_n = 0.77 \times (0.25 + 0.5 \frac{n}{N}) R_{so} - \sigma [(T_{max,k}^4 + T_{min,k}^4)/2] (0.34 - 0.14 \sqrt{e_a}) (0.1 + 0.9 n/N)$$

式中: σ 为 Stefan — Boltzmann 常数 $[4.903 \times 10^{-9}$ MJ/(K⁴ · m² · d)]; $T_{max,k}$, $T_{min,k}$ 分别为绝对温标的最高和最低气温; n 为实际日照时数; N 为可照时数; R_{so} 为晴天辐射。

$$\sigma^2 = \sum_i [W_i \times r(h_{0i})] + \lambda$$

其中: $r(h_{0i})$ 是待估样点到已知样点 p_i 距离为 h_{0i} 时的半方差差值; λ 是最小的可能估计误差。

2.2 资料来源与处理

采用国家气象局整编的 1957~2001 年(45 a) 黄河流域 93 个气象站点的逐日平均气温、最低气温、最高气温、相对湿度、日照时数、经纬度以及海拔高度等数据, 站点分布见图 1。在所选的 93 个站点中, 有部分站点个别年份资料缺测, 故在使用前首先进行了插补订正。由于我国大多数测站是在 20 世纪 50 年代建立的, 因此资料年份起点不一, 鉴于对分析结果的可靠性考虑, 本研究采用的资料均从 1957 年开始进行序列资料分析。

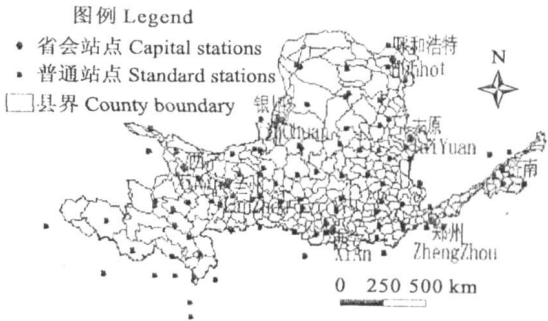


图 1 黄河流域气象站点分布情况

Fig. 1 The distribution of meteorological stations in YRB

在数据处理方面,首先将逐日的数据进行统计,分别得到每年、季节和月的平均数据。其中季节依照常规分为:春季(3~5 月)、夏季(6~8 月)、秋季(9~11 月)、冬季(12 月~翌年 2 月)。对上述数据作进一步处理,分别得到各月、季节的多年平均值。分别对各个气象要素进行了 10 a 滑动平均分析。本文根据地统计学的理论变异函数,采用 GIS 技术进行有关图幅的处理和相关的资料统计,进而描述其空间分布格局。所采用的 Kriging 法利用已知空间抽样样本(在本文中为已知站点数据)对未抽样点(在本文中为未知站点数据)进行估计,通过 Kriging 法的制图技术,将协方差函数和变异函数描述的空间相关性或空间异质性在二维平面上以某种格局的形式表现出来。图像处理由地理信息系统的 Arcinfo 图像处理软件实现。克里格(kriging)插值的精度为 $5.2 \times 5.2 \text{ km}^2$ 。

3 结果与分析

3.1 黄河流域干燥度的空间变化格局

黄河流域东南部属湿润、半湿润气候,中部属半干旱气候,北部为干旱气候。黄河流域多年平均干燥度的地区分布既受气候的制约,又受地形等地理环境的影响,具有明显的地区性差异。干燥度空间分布的总趋势是:北大南小,由北向南递减。全流域多年平均干燥度为 1.78,流域大部分地区年平均干燥度在 1.00~3.50 之间,说明整体上比较湿润。流域西南部小于 1.00,尤其青海的久治干燥度为 0.89 以下,局部地区低于 0.80;干燥度较大的地区为宁夏河套地区、宁夏北部、陕西西北部一带,一般在 2.70~4.50 之间,其中内蒙古临河地区最高,达到 5.90 以上。干燥度分布极为不均,最高与最低之比

大于 6.68,空间分布情况如图 2 所示。上游平均干燥度在 1.39~2.47 之间,平均为 1.99;中游平均干燥度在 0.90~2.68 之间,平均为 1.68;下游平均干燥度在 0.71~2.38 之间,平均为 1.50。



图 2 黄河流域多年平均干燥度分布

Fig.2 The spatial pattern of average arid index of 45 years in YRB

3.2 黄河流域干燥度的时序变化

3.2.1 年际变化 黄河流域干燥度的年际变化也较大。1960 年前后(1957~1966 年)各站点多年平均干燥度在 1.11~2.35 之间,所有站点多年平均为 1.76;1970 年前后(1967~1976 年)各站点多年平均干燥度在 1.34~2.14 之间,所有站点多年平均为 1.72;1980 年前后(1977~1986 年)各气象站点平均干燥度在 1.48~2.26 之间,所有站点多年平均为 1.76;1990 年前后(1987~1996 年)各气象站点平均干燥度在 1.58~2.09 之间,所有站点多年平均为 1.78;2000 年前后(1997~2001 年)各气象站点平均干燥度在 1.68~2.48 之间,所有站点多年平均为 2.07。从总体上来看(图 3),自 1957 年以来,干燥度总体上呈平稳增大趋势。1957~1996 年期间基本处于一个稳定时期,之后呈上升趋势。但是,从黄河流域主要气象站点各年代干燥度的时序变化情况来看,不同区域之间也存在着差异。

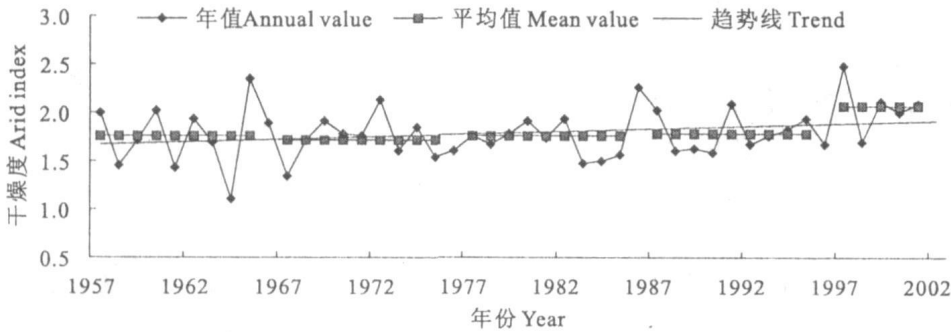


图 3 黄河流域年平均干燥度的时序变化

Fig.3 Temporal changes of annual average arid index in YRB

从上、中、下游变化情况看(图 4),黄河流域上游年际波动较小,年干燥度的变异系数为 13.3%,

说明上游干燥度相对比较稳定,而中、下游年际波动较大,年干燥度的变异系数分别为 20.1% 和

25.0%,中、下游 90 年代前后干燥度平均值较小,上、中、下游 1990 年到 2001 年干燥度平均值都较大。黄河流域不同站点的干燥度的年际变化也十分悬殊,年干燥度的变异系数为 13.9%~60.3%。

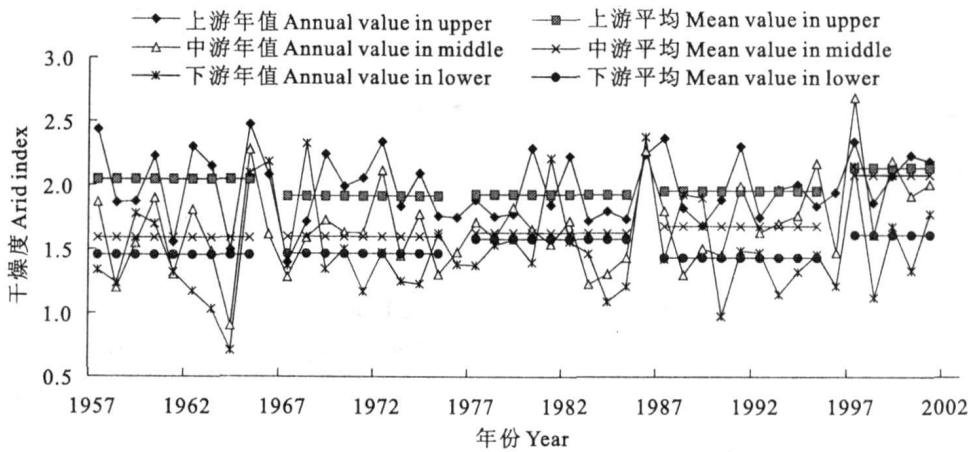


图 4 黄河流域上、中、下游年平均干燥度的时序变化
Fig. 4 Temporal changes of annual average arid index in upper, middle and lower reaches of YRB

3.2.2 季节变化 黄河流域的干燥程度年内分布极不均匀。总体上,冬季>春季>秋季>夏季。由于本流域干燥度主要受降水、温度、日照时数以及季风气流的强弱造成干湿不均匀,因此表现出夏秋季

干燥度小,冬季干燥度大的特征。一年之中,干旱时段高度集中在冬春季(10 月~翌年 2 月),夏秋季(3~9 月)干燥度较小,比较湿润。干湿程度年内分布情况,见图 5 和表 2。

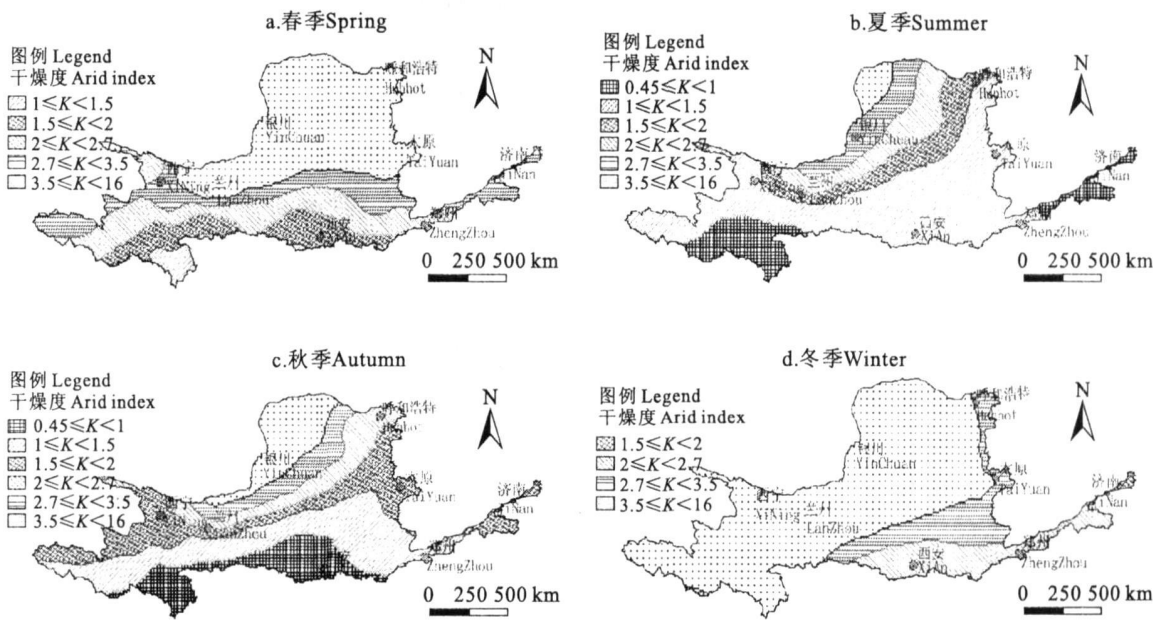


图 5 黄河流域干燥度季节变化分布格局
Fig. 5 The spatial pattern for seasonal average arid index of 45 years in YRB

春季(3~5 月),受大陆变性气团控制,降雨量和风速变化是影响南北差异的一个重要因素,干燥度因降雨量增大而减小,因风速增大而增大。同时随气温的回升,以及东部受海洋性气候影响温度偏高,蒸散量较大,导致干燥度较大。干燥度变化范围在 1.43~6.16 之间。由于春季正是冬小麦返青和

春播的关键时期,但此时期风大,升温快,蒸散大,土壤墒情差,导致气候干燥,若无雨水补充,则不能满足作物需水要求,因此,黄河流域素有“十年九旱”之说,主要就是指春旱。

夏季(6~8 月),是全流域的炎热季节,干燥度受温度的影响最大。由南到北随温度的升高而增大。

表 2 黄河流域上中下游逐月平均干燥度变化情况

Table 2 Monthly changes of arid index in upper, middle and lower reaches of YRB

项目 Items	1 月 Jan.	2 月 Feb.	3 月 Mar.	4 月 Apr.	5 月 May	6 月 Jun.	7 月 Jul.	8 月 Aug.	9 月 Sep.	10 月 Oct.	11 月 Nov.	12 月 Dec.
上游 Upper	6.51	5.61	5.06	3.91	2.56	1.96	1.45	1.32	1.31	2.07	5.85	8.86
中游 Middle	9.59	8.96	4.57	3.16	3.37	2.54	1.12	1.18	1.23	1.71	3.26	8.19
下游 Lower	15.54	15.77	6.19	4.13	4.51	2.48	0.72	0.97	2.98	3.79	6.40	25.14

干燥度总的趋势为北大南小。多年平均干燥度为 0.93~2.06。若雨水少或降水不稳定,则会对农业生产构成极大危害。因此,此期需要及时足量的降雨来弥补蒸散失水,减轻干旱。从另一方面来看,夏季是春玉米、棉花、谷子等秋作物生长最旺盛、需水最多的季节。从水分平衡角度来说,干燥度对作物需水影响非常大,若无及时降雨,持续增强的干旱将会出现春旱与初夏连旱。夏季虽是多雨量的季节,但 8 月中下旬是温度最高,蒸散最大的时候,出现干旱的频次也较多,即所谓卡脖子旱。

秋季(9~11 月),大陆冷高压气团再度从西北方向控制黄河流域,温度下降,降水减小,干燥度由南到北逐渐减小,多年平均干燥度变化幅度为 0.77~2.95。秋季虽不是作物的生长关键期,但干燥度大,导致土壤墒情差,常常影响冬小麦的适时播种。

冬季(12 月~翌年 2 月),干燥度主要受降雨的影响。干燥度基本呈西北大东南小的趋势。多年平均干燥度为 1.65~10.93,受干冷气团控制,降水极低,气候干燥,相对湿度低,导致干燥度大。而此期是越冬作物的休眠期,作物需水量小,所以此期干燥度大对作物影响不大。但冬季干旱,土壤的墒情差,对春旱有影响。

3.2.3 逐月变化 由表 2 可以看出,具体到各月分配情况而言,黄河流域上、中、下游干燥度均以 7~9 月份最小,11 月~翌年 3 月最大,这主要由降雨量多少和温度高低共同作用所致。各月干燥度基本上呈现出上游小,下游大,中游居中的格局,且 9 月~翌年 3 月最为明显。

4 结 论

1) 黄河流域多年平均干燥度为 1.78。年干燥

度空间分布的总趋势是:北大南小,由北向南递减,具有明显的地区性差异。

2) 黄河流域上游年际波动较小,年干燥度的变异系数为 13.3%,中、下游年际波动较大,年干燥度的变异系数分别为 20.1%和 25.0%,中、下游 90 年代前后干燥度平均值较小,上、中、下游 1990 年代末到 2001 年干燥度平均值都较大。黄河流域不同站点的干燥度的年际变化也十分悬殊,年干燥度的变异系数为 13.9%~60.3%。

3) 干燥度的季节变化为,夏秋季干燥度小,冬季干燥度大;干燥度的月变化为,7~9 月份最小,11 月~翌年 3 月最大,这主要由降雨量多少和温度高低共同作用所致。各月、季干燥度的变化对作物生长发育具有重要影响。

参 考 文 献:

[1] 顾世祥,王士武,袁宏源.参考作物腾发量预测的径向基函数法[J].水科学进展,1999,10(2):123-128.

[2] 刘 钰,蔡林根.参照腾发量的新定义及计算方法对比[J].水利学报,1997,6:27-33.

[3] Allen R G, Smith M, Pereira L S, et al. An up date for the calculation of reference evapo transpiration[J]. ICD Bulletin, 1994, (2):64-92.

[4] 邵晓梅,严昌荣.黄河流域半湿润偏旱区土壤水分动态变化规律研究[J].干旱地区农业研究,2006,24(2):91-94.

[5] 刘 钰,蔡甲冰,蔡林根,等.黄河下游灌区农田灌溉制度与供需平衡分析[J].水利学报,2005,36(6):701-708.

[6] 赵秉栋,赵庆良,焦兴士,等.黄河流域水资源可持续利用研究[J].水土保持研究,2003,10(4):102-104.

[7] 李笑吟,毕华兴,张 志,等.晋西黄土区土壤水分有效性分析的克立格法[J].土壤学报,2006,43(6):1004-1010.

[8] 李海滨,林忠辉,刘苏峡.Kriging 方法在区域土壤水分估值中的应用[J].地理研究,2001,20(4):446-452.

Study on spatial and temporal variation of arid index in Yellow River Basin

SHI Jian-guo^{1,2}, ZHANG Yan-qing¹, HE Wen-qing¹, LIU Qin¹

(1. Institute of Environment and Sustainable Development on Agriculture, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China; 2. Baotou Light Industry & Vocational Technical College, Baotou, Inner Mongolia 014045, China)

Abstract: The arid index was calculated with Penman—Monteith method recommended by the FAO in 1990, based on climatic data of 93 meteorological stations in Yellow River Basin (YRB) authorized by the National Meteorological Bureau from 1957 to 2001, and the arid index distribution in Yellow River basin was also created through the kriging method. The result shows that the spatial distribution of arid index is strongly affected by climatic and geographical factors, and the arid index decreases from the north to the south. From 1957 to the end of 1990s, the trend of arid index was stable at first and then increased. At the same time, the seasonal variation of the arid index was obvious, which was winter > spring > autumn > summer. The maximum value of the arid index occurred in July, August and September in the upper, middle and lower reaches of the YRB respectively, and the minimum values were from November to the next March with a distinct regional variation.

Key words: Yellow River Basin(YRB); arid index; Penman—Monteith method; spatial—temporal pattern; Kriging

(上接第 241 页)

Application and comparison of three meteorological drought indices

HAN Hai-tao¹, HU Wen-chao¹, CHEN Xue-jun¹, WANG Nai-ang², LI Gang²

(1. Gansu Meteorological Information Center, Lanzhou, Gansu 730020, Chian;
2. School of Resources and Environmental Science, Lanzhou University, Lanzhou, Gansu 730000, China)

Abstract: Drought is a kind of meteorological disaster that has hurt severely agricultural production and affected economic development and people's living in China over a long period of time. Based on the research about drought and drought indices at home and abroad, this paper mainly compared and analyzed a few meteorological drought indices usually used in current domestic and international researches, and pointed out the merit and shortcoming as well as applicability of each drought index. The percentage of precipitation anomaly (Pa) has several characteristics, such as simple calculation, easy to obtain data, slow extent of response to the drought, and no reflection of the inherent mechanism of the drought. With sensitive response to drought, the standard precipitation index (SPI) can be applied to different time scales and stability calculation, while the Palmer drought index (PDSI) not only reflects the extent of drought but also includes the start and end time of drought.

Key words: meteorology; drought index; comparison