

# 黄河流域气候水分盈亏时空格局分析

邵晓梅<sup>1</sup> 许月卿<sup>2</sup> 严昌荣<sup>3</sup>

- 1 中国土地勘测规划院国土资源部土地利用重点实验室, 北京 100035
- 2 中国农业大学资源与环境学院土地资源管理系, 北京 100094
- 3 中国农业科学院农业环境与可持续发展研究所, 北京 100081

**摘要** 以中国气象局整编的1961~2001年的气象资料为数据基础, 采用联合国粮食及农业组织(FAO)1998年推荐使用的Penman-monteith模型, 并以GIS技术为手段进行黄河流域气候水分盈亏的时空分布格局分析。结果表明: 黄河流域干旱缺水是一种普遍现象, 气候水分盈亏量在空间上总的变化规律表现为自南向北、自东向西气候水分亏缺量呈逐渐增大趋势, 大部分地区全年气候水分亏缺量介于200~600 mm之间; 就季节分布而言, 水分亏缺的主要时期在春季和初夏, 亏缺量一般在180~300 mm之间; 就典型站点气候水分盈亏量逐月变化而言, 存在着区域差异。研究结果和结论对区域充分发挥水分利用效率、发展高效节水农业具有重要意义。

**关键词** 气候水分盈亏 时空格局 黄河流域

**文章编号** 1006-9585 (2007) 01-0074-07 **中图分类号** S152.7 **文献标识码** A

## Analysis on the Spatial and Temporal Structure of Climatic Water Deficit in the Yellow River Basin

SHAO Xiao-Mei<sup>1</sup>, XU Yue-Qing<sup>2</sup>, and YAN Chang-Rong<sup>3</sup>

- 1 *Key Laboratory of Land Use, Ministry of Land and Resources, China Land Surveying and Planning Institute, Beijing 100035*
- 2 *Department of Land Resource and Administration, College of Resources and Environment, China Agricultural University, Beijing 100094*
- 3 *Institute of Agricultural Environment and Sustainable Development, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081*

**Abstract** Based on the data from 1961 to 2001 of 85 weather stations, according to the Penman-monteith model of Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO) nominated in 1998, the spatial and temporal structure and changes of climatic water deficit in the Yellow River Basin were discussed. It was showed that water shortage was a common phenomena in the Yellow River Basin, and the amount of climatic water deficit increased gradually from south to north and from east to west in the space, which changed between 200 mm and 600 mm in the most areas. In views of the seasonal changes of climatic water deficit, water shortage happens in spring and early summer, which is exposed to being between 180 mm and 300 mm generally. In views of the changes of climatic water deficit in every month in typical stations, there presented regional differences. The conclusions were very important to increase water utilization effi-

**收稿日期** 2005-08-26 收到, 2006-08-10 收到修定稿

**资助项目** 中国工程院咨询项目“中国区域农业资源合理配置、环境综合治理和农业协调发展战略研究”, Challenge Program on Water & Food “Conservation agriculture for the dry-land areas of the Yellow River Basin”, 国土资源部百名优秀科技人才计划项目

**作者简介** 邵晓梅, 女, 1972年出生, 博士, 副研究员, 主要从事土地资源利用及节水农业研究。E-mail: shaoxmbj@sina.com; shaoxiaomei@mail.clspi.org.cn

**通讯作者** 严昌荣, 男, 博士, 研究员。E-mail: yanrc@cjac.org.cn

ciency and high efficient agricultural construction of water saving in the Yellow River Basin.

**Key words** climatic water deficit, spatial and temporal structure, Yellow River Basin

## 1 引言

黄河流域位于我国北部缺水的干旱、半干旱和半湿润地区，由于流域幅员辽阔，山脉众多，东西高差悬殊，受大气环流和季风环流影响的情况比较复杂，流域内不同地区气候差异较大但总体干旱，因而造成河川径流量较少，水资源比较匮乏。它以占全国 2 % 的径流量，向占全国 15 % 的耕地和 12 % 的人口供水；流域内人均占有水量和每公顷耕地占有水量分别为 593 和 4 860 m<sup>3</sup>，是全国平均水平的 25 % 和 17 %。水分是作物生长、发育的重要环境因子之一，而气候水分盈亏量及其分布规律决定于降水量和影响农田蒸散量的太阳辐射、气温、湿度和风速等气象要素的大小和季节分布，是不同时段的降水量与同期农田潜在蒸散量 ( $E_{T_0}$ ) 之差值 (简称降-蒸差)，降-蒸差是决定气候湿润与干旱的指标<sup>[1]</sup>。根据各气象站点各月和年的多年平均气象要素值可计算得出气候水分盈亏量。如果以  $P$  表示降水量，则当  $P > E_{T_0}$  时，表示该地降水能够满足蒸发所需要的水分，水分有盈余，为气候上的湿润季节；当  $P < E_{T_0}$  时，表示该地降水不能满足蒸发所需要的水分，水分亏缺，为气候上的干旱季节<sup>[2]</sup>。气候水分盈亏量可充分反映农业气候资源的优劣和农业生产条件的高低。近年来，前人已对气候变化对水资源的影响和黄河流域水资源可持续利用与管理、水资源短缺原因及对策等做了诸多研究<sup>[3~7]</sup>，但缺乏定量分析黄河流域气候水分时空变化的研究，本文以中国气象局整编的 1961~2001 年的气象资料为数据基础，采用联合国粮食及农业组织 (FAO) 1998 年推荐使用的 Penman-monteith 模型，并以 GIS 技术为手段进行黄河流域气候水分盈亏的空间分布格局分析，以及主要站点在不同季节的变化情况，并以卢氏、延安、西宁为典型站点进一步分析其变化特征。研究结果和结论可为分析流域农田水分规律、科学用水、节约用水，充分发挥水分的利用效率提供科学的依据。

## 2 农田潜在蒸散量的计算

Penman-monteith 方法是联合国粮农组织定为计算  $E_{T_0}$  的首选方法，因为这一方法以能量平衡和水汽扩散论为基础，既考虑了作物的生理特征，又考虑了空气动力学参数的变化，具有较充分的理论依据和较高的计算精度。1998 年联合国粮农组织对 Penman-monteith 模型进行了进一步修订，定义了一个高 0.12 m，表面阻力为 70 s · m<sup>-1</sup>，反射率为 0.23 的假想参考作物面来计算参考作物蒸发。假想面类似于同一高度，生长旺盛，完全覆盖地面，水分充足的广阔绿色植被。使用这样假想的统一下垫面，不但与陆面蒸发的机理相同，而且避免了各种与气候要素无关的因素，如植被类型、高度、生长状况等影响  $E_{T_0}$ ，保证了  $E_{T_0}$  仅为气候要素的函数，增加了地区和季节年份间的可比性，可适应于不同的自然环境条件，在国际上和国内已得到充分肯定和广泛应用<sup>[8,9]</sup>。其公式如下：

$$E_{T_0} = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} U_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34U_2)}$$

式中： $E_{T_0}$  为最大可能蒸散，单位 mm · h<sup>-1</sup>； $R_n$  为净辐射，单位 MJ · m<sup>-2</sup> · h<sup>-1</sup>； $G$  为土壤热通量，单位为 MJ · m<sup>-2</sup> · h<sup>-1</sup>； $T$  为空气温度，单位为 °C； $e_s$  为空气温度的饱和水汽压，单位为 kPa； $e_a$  为空气的饱和水汽压，单位为 kPa； $U_2$  为距地面 2 m 高度的风速，单位为 m · s<sup>-1</sup>； $\Delta$  为在当前空气温度时的饱和水汽压曲线的斜率，单位为 kPa · °C<sup>-1</sup>； $\gamma$  为干湿计常数，单位为 kPa · °C<sup>-1</sup>。该模型所需数据为：最低和最高气温、风速、相对湿度和日照时数。本文在采用上述模型计算最大可能蒸散时，变量基本上采用原模型的方法计算，但净辐射需要进行地区校正。净辐射  $R_n$  的计算公式为<sup>[10]</sup>：

$$R_n = 0.77 \times (0.248 + 0.752 \frac{n}{N}) R_{so} - \sigma[(T_{\max,K}^4 + T_{\min,K}^4)/2]$$

$$\times (0.56 - 0.08 \sqrt{e_d})(0.1 + 0.9n/N)$$

式中:  $\sigma$  为 Stefan-Boltzmann 常数 ( $4.903 \times 10^{-9} \text{ MJ} \cdot \text{K}^{-4} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ ),  $T_{\max, K}$  和  $T_{\min, K}$  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,  $e_d$  为实际水汽压。

由于采用 Penman-monteith 模型计算  $E_{T_0}$  所需参数比较多, 计算过程也相对复杂。计算所需参数列在表 1 中。

表 1 Penman-monteith 模型计算农田潜在蒸散量参数表  
Table 1 The parameters for calculating potential evaporation by using Penman-monteith model

彭曼公式参数	数据来源	时段	作用
日气温	原数据	1961~2001	计算 $\Delta$ 和 $e_a$
日风速	校正至 2 m 高度风速	1961~2001	—
相对湿度	原数据	1961~2001	计算 $e_d$
日照百分率	由日照时数计算	1961~2001	—
海拔高度	原数据	—	计算 $\gamma$
台站纬度	原数据	—	计算 $R_{so}$

### 3 总的分布趋势分析

从总体上来看 (图 1 和表 2), 黄河流域干旱缺水是一种普遍现象。在空间上总的变化规律表现为: 自南向北、自东向西气候水分亏缺量呈逐渐增大趋势, 即由半湿润区→半湿润偏旱区→半干旱区→半干旱偏旱区→干旱区气候水分亏缺量呈逐渐增大的变化趋势, 大部分地区全年气候水分亏缺量介于 200~600 mm 之间。其中, 半湿润区全年气候水分亏缺量介于 200~300 mm 之间, 而干旱区全年气候水分亏缺量则达到 500~700 mm 之间; 从全年气候水分亏缺的季节分布情况来看, 水分亏缺的主要时期在春季和初夏, 这个时期的亏缺量一般在 180~300 mm 之间。如表 1 中春、夏季节水分亏缺最少的济南亏缺量为 140.57 mm, 占全年亏缺量的 51.48%; 而全年气候水分亏缺量最少的宝鸡春、夏季节水分亏缺的比重则达 87.5%。而盛夏和秋季水分条件比较好一些, 部分站点 7~8 月水分略有盈余, 但大部分地区仍有欠缺。

表 2 不同类型旱农区代表站点气候水分盈亏量

Table 2 The changes of climatic water deficit in different dry farming areas

旱作类型区	代表站点	春季	夏季	秋季	冬季	全年
干旱区	兰州	-204.30	-189.96	-82.54	-61.66	-538.47
	银川	-218.49	-269.95	-108.44	-47.99	-644.88
	阿拉善左旗	-243.19	-291.64	-129.68	-57.60	-722.15
半干旱偏旱区	海源	-199.50	-154.31	-77.98	-72.29	-504.08
	榆中	-241.67	-198.85	-101.98	-96.64	-639.13
半干旱区	太原	-199.18	-97.25	-55.77	-61.57	-413.78
	西宁	-217.84	-160.16	-95.83	-89.82	-563.66
	呼和浩特	-217.48	-121.58	-76.13	-41.34	-456.55
半湿润偏旱区	三门峡	-135.81	-112.71	-0.37	-61.30	-310.20
	延安	-209.30	-101.52	-42.11	-80.36	-433.29
	介休	-183.91	-92.96	-38.11	-59.18	-374.17
半湿润区	宝鸡	-119.60	-98.71	45.28	-76.46	-249.48
	济南	-202.99	62.42	-70.43	-62.08	-273.06
	卢氏	-128.03	-83.99	4.20	-74.90	-282.73

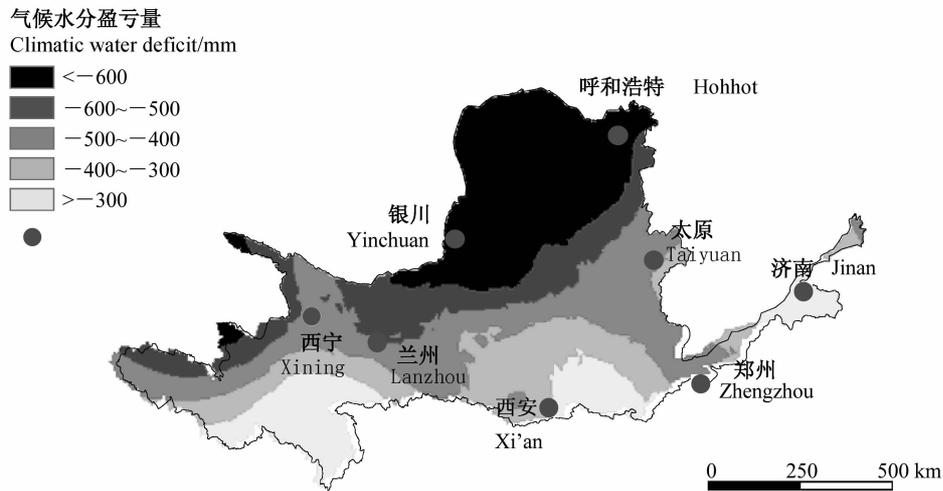


图1 黄河流域气候水分盈亏量的空间分布特征  
Fig.1 The spatial structure of climatic water deficit in the Yellow River Basin

## 4 典型站点气候水分盈亏量逐月变化情况

### 4.1 半湿润区

以位于半湿润区的河南省卢氏试验站为例，卢氏试验站 1961~2001 年平均降水量为 608.22 mm，农田潜在蒸散量  $E_{T_0}$  为 890.95 mm，全年水分亏缺 282.73 mm。从降水量和潜在蒸发量的时间分布曲线来看（图 2），二者均呈单峰型。土壤潜在蒸发量的波峰出现时间相同，均在 7 月。从各月变化情况来看，1~6 月和 11~12 月降水量小于潜在蒸发量，水分亏缺；7~8 月降水量基本和潜在蒸发量持平，水分相当；9~10 月降水量大于土壤潜在蒸发量，水分有盈余。但从全年来看，水分是亏缺的。说明卢氏试验站在冬春季节气候干旱，夏秋季节为湿润季节。

### 4.2 半湿润偏旱区

以位于半湿润偏旱区的陕西省延安试验站为例，延安试验站 1961~2001 年平均降水量  $P$  为 514.31 mm，农田潜在蒸散量  $E_{T_0}$  为 947.6 mm，全年水分亏缺 433.29 mm。从降水量和潜在蒸发量的时间分布曲线来看（图 3），二者均呈单峰型。潜在蒸发量的波峰出现时间比降水量的早两个月，前者在 6 月，后者在 8 月。从各月变化情况来看，8~9 月降水量大于土壤潜在蒸发量，水分略有盈余；而其他月份降水量小于土壤潜在蒸发量，水

分亏缺，最高月份（5 月）亏缺达 86.1 mm，但冬春季节水分亏缺量较少；但从全年来看，水分总体上是亏缺的。另一方面，潜在蒸发量时间分布曲线离散程度大，降水量时间分布曲线离散程度小，其结果一方面导致干、湿季节明显，另一方面造成湿润季节短促，干旱季节漫长。

### 4.3 半干旱区

以位于半干旱区的青海省西宁试验站为例，西宁试验站 1961~2000 年平均降水量为 359.52 mm，农田潜在蒸散量  $E_{T_0}$  为 923.18 mm，全年水分亏缺 563.66 mm。从降水量和土壤潜在蒸发量的时间分布曲线来看（图 4），二者均呈单峰型。土壤潜在蒸发量的波峰出现时间均在 7 月。从各月变化情况来看，夏秋季节水分条件虽有所好转，但水分总体上仍是亏缺的，说明西宁试验站在气候上干旱比较严重。

## 5 结论

本文采用 FAO1998 年推荐使用的 Penman-monteith 模型，通过计算黄河流域 85 个气象站点的  $E_{T_0}$ ，就不同类型旱农区的气候水分盈亏进行了分析，主要结论如下：

(1) 气候水分盈亏量可以较好地反映区域农业水分条件的好坏和农业生产条件的高低，当区域降水能够满足蒸发所需要的水分时，水分有盈余，为气候上的湿润季节，说明农业生产条件较

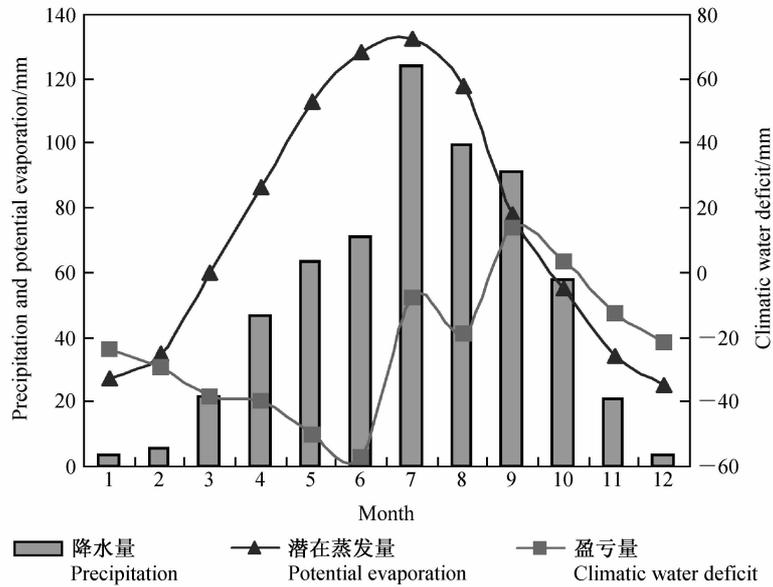


图2 卢氏站降水量、潜在蒸发量和气候水分盈亏量的时间分布  
Fig. 2 The distribution of precipitation, potential evaporation and climatic water deficit in Lushi station

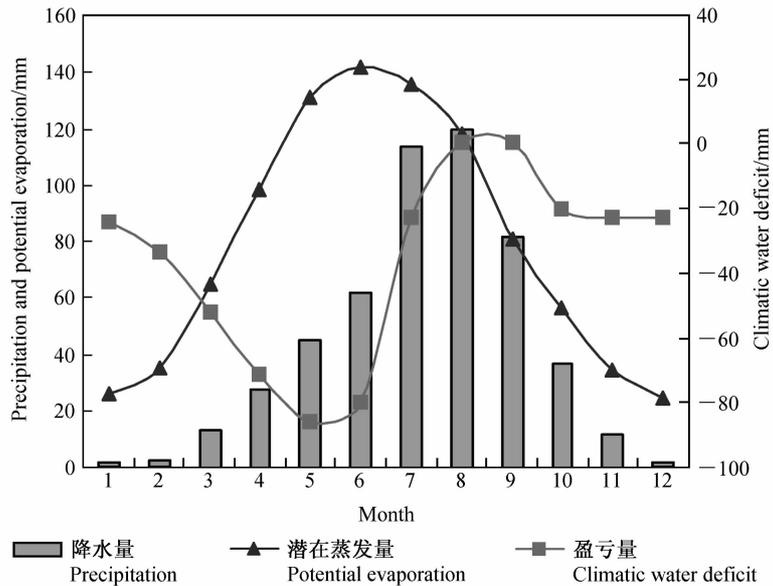


图3 延安站降水量、潜在蒸发量和气候水分盈亏量的时间分布  
Fig. 3 The distribution of precipitation, potential evaporation and climatic water deficit in Yan'an station

好；当区域降水不能满足蒸发所需要的水分时，水分亏缺，为气候上的干旱季节，可视亏缺程度适时补充灌溉。

(2) 从总体上来看，黄河流域干旱缺水是一种普遍现象。黄河流域气候水分盈亏量在空间上总的变化规律表现为：自南向北、自东向西气候

水分亏缺量呈逐渐增大趋势，大部分地区全年气候水分亏缺量介于 200~600 mm 之间；从全年气候水分亏缺的季节分布情况来看，水分亏缺的主要时期在春季和初夏，这个时期的亏缺量一般在 180~300 mm 之间。

(3) 就典型站点气候水分盈亏量逐月变化而

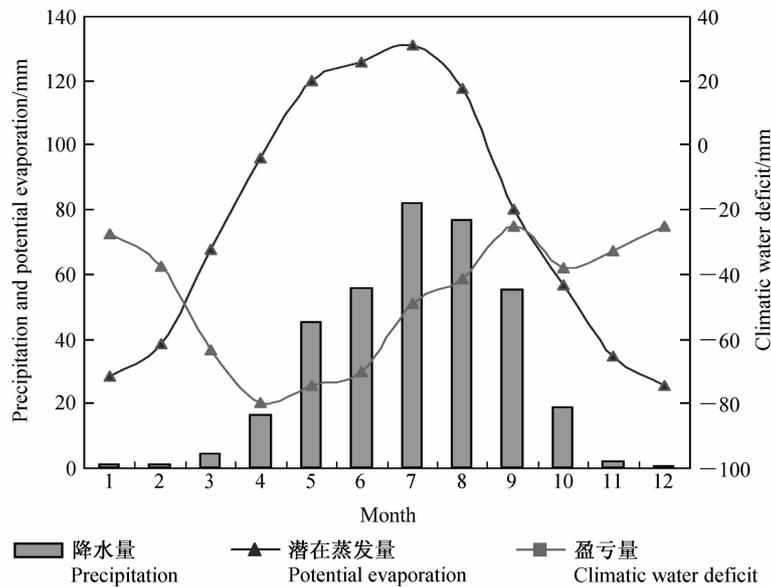


图 4 西宁站降水量、潜在蒸发量和气候水分盈亏量的时间分布

Fig. 4 The distribution of precipitation, potential evaporation and climatic water deficit in Xining station

言，存在着区域差异。如位于半湿润区的河南省卢氏试验站全年水分亏缺 282.73 mm，在冬春季气候干旱，夏秋季节为湿润季节。位于半湿润偏旱区的陕西省延安试验站全年水分亏缺 433.29 mm，且表现为湿润季节短促，干旱季节漫长。位于半干旱区的青海省西宁试验站全年水分亏缺 563.66 mm，在气候上干旱比较严重。

### 参考文献 (References)

[1] 陶毓汾, 王立祥, 韩仕峰, 等. 中国北方旱农地区水分生产潜力及开发. 北京: 气象出版社, 1993  
Tao Yufen, Wang Lixiang, Han Shifeng, et al. *Water Potential Productivity and Its Exploitation in Dry-Land Farming Region of Northern China* (in Chinese). Beijing: Meteorological Press, 1993

[2] 赵聚宝, 徐祝龄, 钟兆站, 等. 中国北方旱地农田水分平衡. 北京: 中国农业出版社, 2000  
Zhao Jubao, Xu Zhuling, Zhong Zhaozhan, et al. *Field Water Balance in Dry-Land of Northern China* (in Chinese). Beijing: Agricultural Publishing House of China, 2000

[3] 赵秉栋, 赵庆良, 焦士兴, 等. 黄河流域水资源可持续利用研究. 水土保持研究, 2003, 10 (4): 102~104  
Zhao Bingdong, Zhao Qingliang, Jiao Shixing, et al. Study on sustainable utilization of water resources of the Yellow River drainage basin. *Research of Soil and Water Conservation* (in Chinese), 2003, 10 (4): 102~104

[4] 杨志峰, 李春晖. 黄河流域上游降水时空结构特征. 地理科学进展, 2004, 23 (2): 27~33  
Yang Zhifeng, Li Chunhui. The spatial and temporal structure of precipitation in the Yellow River basin. *Progress in Geography* (in Chinese), 2004, 23 (2): 27~33

[5] 王海英, 董锁成. 黄河沿岸地带水资源短缺的症结与对策探讨. 自然资源学报, 2002, 17 (5): 590~596  
Wang Haiying, Dong Suocheng. Analysis of cruxes to water scarcity and countermeasures in areas along the Yellow River. *Journal of Natural Resources* (in Chinese), 2002, 17 (5): 590~596

[6] 安刚, 孙力, 廉毅. 东北地区可利用降水资源的初步分析. 气候与环境研究, 2005, 10 (1): 132~139  
An Gang, Sun Li, Lian Yi. A Primary Analysis of utilizable precipitation in northeast China. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese), 2005, 10 (1): 132~139

[7] 王守荣, 郑水红, 程磊. 气候变化对西北水循环和水资源影响的研究. 气候与环境研究, 2003, 8 (1): 43~51  
Wang Shourong, Zheng Shuihong, Cheng Lei. Studies on impacts of climate change on water cycle and water resources in northwest China. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese), 2003, 8 (1): 43~51

[8] 刘钰, Pereira L S, Teixeira G L, 等. 参照蒸发量的新定义和计算方法对比. 水利学报, 1997, (6): 27~33  
Liu Yu, Pereira L S, Teixeira G L, et al. Update definition and computation of reference evapotranspiration comparison with former method. *Journal of Hydraulic Engineering* (in Chinese), 1997, (6): 27~33

[9] Walter I A, Allen R G, Elliott R, et al. ASCE's standard-

- ized reference evapotranspiration equation. In: *Proceedings of the 4th Decennial Symposium, National Irrigation Symposium*, Evans R L, Ed. Michigan: American Society of Civil Engineers, 2000. 1~6
- [10] 吴绍洪, 尹云鹤, 郑度, 等. 青藏高原近 30 年气候变化趋势. *地理学报*, 2005, **60** (1): 3~11
- Wu Shaohong, Yin Yunhe, Zheng Du, et al. Climate changes in the Tibetan plateau during the last three decades. *Acta Geographica Sinica* (in Chinese), 2005, **60** (1): 3~11