

DOI: 10.5846/stxb201306101623

赵焱,李志,刘文兆,王小静.泾河流域潜在蒸散量的时空变异.生态学报,2014,34(19):5600–5608.

Zhao C, Li Z, Liu W Z, Wang X J. Spatiotemporal characteristics of potential evapotranspiration during current and future period in the Jinghe watershed. Acta Ecologica Sinica 2014, 34(19): 5600–5608.

## 泾河流域潜在蒸散量的时空变异

赵焱<sup>1</sup>,李志<sup>1,\*</sup>,刘文兆<sup>2</sup>,王小静<sup>1</sup>

(1. 西北农林科技大学资源环境学院,杨凌 712100;

2. 西北农林科技大学水土保持研究所 黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室,杨凌 712100)

**摘要:**潜在蒸散量是水文循环中的重要变量,分析其当前特征并预测未来变化,对于区域干旱和水文特征分析具有重要的参考意义。基于 15 个气象站点的日数据、NCEP 再分析数据以及 HadCM3 的预测数据,在分析当前潜在蒸散量的基础上,应用统计降尺度方法对泾河流域 21 世纪的潜在蒸散量进行了预测。结果表明,1961—2005 年泾河流域潜在蒸散量年均值为 934.6 mm,且存在空间差异,整体由东向西南方向递减;时间变化上呈不显著的上升趋势。21 世纪泾河流域潜在蒸散量呈显著的上升趋势,但存在季节差异,夏季增幅较大而冬季增幅较小;空间分布基本保持现有模式,但区域差异增大。潜在蒸散量增加可能加剧泾河流域的干旱状况,需提前采取一定的应对措施。

**关键词:**泾河流域;潜在蒸散量;统计降尺度;情景分析

## Spatiotemporal characteristics of potential evapotranspiration during current and future period in the Jinghe watershed

ZHAO Cha<sup>1</sup>, LI Zhi<sup>1,\*</sup>, LIU Wenzhao<sup>2</sup>, WANG Xiaojing<sup>1</sup>

1 College of Resources and Environment, Northwest Agriculture and Forestry University, Yangling 712100, China

2 State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming of Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, Northwest Agriculture and Forestry University, Yangling 712100, China

**Abstract:** Potential evapotranspiration ( $ET_0$ ) is a key variable of hydrological cycle and has important applications to hydrological modeling and crop irrigation scheduling. Under the background of global warming, analyzing the spatiotemporal characteristics of the present and future  $ET_0$  can provide important information for regional water resource management and sustainable agricultural development. To study the impacts of ecological construction and climate change in the past 50 years on the hydrology in the Jinghe watershed, some researches have assessed the changes of  $ET_0$  for the present period; however, almost no study has focused on the potential changes of  $ET_0$ . The objective of this study is to project the change of  $ET_0$  during 21<sup>st</sup> century on the basis of the current  $ET_0$  analysis and further discuss its impacts on climate in the Jinghe watershed. The data used in this study included daily weather data from 15 meteorological stations, NCEP reanalysis data which reflects the quasi-observed climate condition and GCM grid outputs from HadCM3 under A2 and B2 scenarios. Penman-Monteith (PM) method and statistical downscaling model (SDSM) were used to calculate  $ET_0$  for the present period of 1961–2005 and project  $ET_0$  for the future period of 2011–2099, respectively. The determination coefficient and Nash – Sutcliffe model efficiency coefficient were used to assess the performance of SDSM. The inverse distance weighted interpolation and nonparametric Mann-Kendall test was used to analyze the spatial distribution and temporal change of  $ET_0$ .

基金项目:国家自然科学基金项目(41101022);霍英东基金(141016);中央高校基本科研业务费(2014YQ003)资助

收稿日期:2013-06-10; 修订日期:2014-07-13

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: lizhibox@126.com

<http://www.ecologica.cn>

respectively. Results showed that  $ET_0$  calculated by PM formula correlated to the pan evaporation well, which means that the estimated  $ET_0$  is reliable. With annual average of 934.6 mm for the present period,  $ET_0$  had a spatial difference decreasing from the east to the southwestern part of the Jinghe watershed. An insignificant upward trend of annual  $ET_0$  was detected for the present period and an abrupt change occurred in 1977. The monthly  $ET_0$  distributed as a single peak curve with the greatest and smallest value in June and December, respectively. During 21<sup>st</sup> century,  $ET_0$  would greatly increase by 1.9 mm/a and 0.9 mm/a under A2 and B2 emission scenarios, respectively.  $ET_0$  appeared to increase dramatically since 2049 and have an upward abrupt change in 2061. Future  $ET_0$  also varied among seasons with the greatest increase in summer and the least in winter. The spatial distribution of future  $ET_0$  was similar to the current period, but the regional difference would increase over time. The aridity index calculated by the ratio of  $ET_0$  to precipitation revealed that the Jinghe watershed would be threatened by more severe drought during 21<sup>st</sup> century, and most regions would have semiarid climate at the end of 21<sup>st</sup> century though now it is a transition region with semiarid and subhumid climate. The uncertainties in this study are mainly from GCM and downscaling method; however, as the GCM from HadCM3 used in this study has the best performances in simulating Chinese climate and SDSM has good performances in downscaling the present  $ET_0$ , the results should be reliable and will be further validated with more GCM data and downscaling methods. The continuous increase in  $ET_0$  and drought would aggravate the water shortage and further influence the ecological construction and regional development in the Jinghe watershed; therefore, some countermeasures should be adapted in advance to minimize the adverse impacts.

**Key Words:** Jinghe watershed; potential evapotranspiration; statistical downscaling; scenario analysis

潜在蒸散量( $ET_0$ )是实际蒸散量的理论上限,也是计算实际蒸散量的基础<sup>[1]</sup>,在气候干湿状况分析、水资源合理利用评价、农业作物需水与生产管理、生态环境变化等研究中得到广泛应用<sup>[2-3]</sup>。分析 $ET_0$ 的时空变异对研究气候变化的水文效应、植被耗水长期演变等具有重要意义。全球气候变化背景下,处于半湿润向半干旱气候过渡地带的泾河流域过去几十年暖干化趋势显著<sup>[4]</sup>降水减少、温度升高及极端降水事件增多<sup>[5-7]</sup>,年径流量减少,枯水出现年份周期缩短<sup>[8-9]</sup>,这都与蒸散的变化密切相关。泾河流域作为生态环境脆弱区及气候变化敏感区之一, $ET_0$ 的变化直接关系着流域的干湿状况、水资源演变和植物需水。

部分研究通过计算或蒸发皿数据对泾河流域蒸散量进行了分析。杨小利等利用泾河流域上游4个站点1965—2010年的气象数据,发现 $ET_0$ 在1个站点显著增加,而其他站点变化不显著<sup>[10]</sup>;王佩等通过泾河流域14个气象站点1957—2002年器皿蒸发数据,发现蒸发量降低<sup>[11]</sup>;张淑兰等利用水文模型SWIM对1997—2003年泾河上游流域的实际蒸散量及其各组分进行了估算<sup>[12]</sup>,并进行了气候变化敏感性分析,发现降水变化将导致蒸散具有相同的变化方向<sup>[13]</sup>。可见,由于站点和时段选择等原因,目前

针对泾河流域蒸散的研究尚不充分,特别是针对未来气候变化下的 $ET_0$ 分析薄弱。全球气候变化背景下,黄土高原进入21世纪以后,降水增加,气候由暖干趋向暖湿<sup>[14]</sup>,与政府间气候变化专门委员会(IPCC, Intergovernmental Panel on Climate Change)第四次评估报告中对21世纪末关于降水减少的预测有所不同。因此,在分析泾河流域 $ET_0$ 当前特征的基础上预测其未来变化显得尤为重要。

未来气候变化预测多基于大气环流模式(GCM, General Circulation Model)进行,但由于GCM分辨率较低,输出的数据基于网格尺度(HadCM3(Hadley Centre Coupled Model, version 3)的网格,经度×纬度=2.5°×3.75°)不能考虑小尺度的区域差异,在模拟分析区域尺度的气候变化方面尚不理想<sup>[15]</sup>。因此,非常有必要对GCM数据进行降尺度以获得更加准确的气候变化信息<sup>[16-17]</sup>。降尺度有动力学和统计学降尺度两种方法<sup>[18]</sup>,其中,统计方法通过建立GCM与实测数据之间的统计关系预测未来气候变化,由于容易实现并可按照当地条件进行校准而被广泛应用。但降尺度预测目前多应用于温度及降水的预测<sup>[17]</sup>,蒸散预测的应用相对较少。

本研究以泾河流域为研究区,在计算和分析当前时期 $ET_0$ 变化的基础上,对HadCM3输出的A2和

B2 情景数据进行降尺度预测  $ET_0$ , 建立 21 世纪 20 年代、50 年代和 80 年代未来 3 个时期的  $ET_0$  变化情景, 分析该区 21 世纪  $ET_0$  变化趋势, 旨在为合理利用水资源、应对气候变化提供科学决策依据。

## 1 数据与方法

### 1.1 研究区域与数据来源

泾河流域地处黄土高原中部(图 1), 流经陕甘宁 3 省(区) 31 个县(市), 流域面积 45421 km<sup>2</sup>, 水土流失面积 41375 km<sup>2</sup>。流域处于半湿润-半干旱过渡地带, 为典型的温带大陆性气候。气温和雨量由东南向西北逐渐递减, 年均气温 8—13 °C, 年均降水量 390—560 mm。冬春干旱少雨, 夏季多暴雨, 旱灾较频繁。泾河流域地形复杂多样, 是世界上水土流失最严重的地区之一, 80% 以上的土地面临着水土流失。

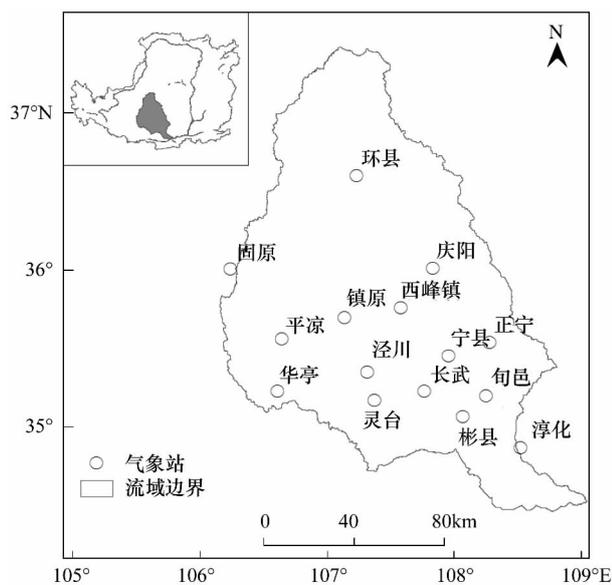


图 1 泾河流域位置及气象站点分布图

Fig. 1 The location of the Jinghe watershed and the meteorological stations

研究使用的数据包括 3 部分: 实测数据、NCEP (National Centers for Environmental Prediction) 再分析数据和 GCM 预测数据。实测数据来源于泾河流域内部 15 个气象站点(图 1) 1961—2005 年日序列数据, 包括降水、温度、相对湿度、风速和日照时数等, 用于计算当前时段的  $ET_0$ 。研究中需要借助反映实际气候状况的再分析资料, 由美国环境预报中心 (NCEP) 和国家大气研究中心 (NCAR, the National Center for Atmospheric Research) 联合提供, 时段为

1961—2000 年, 包括平均海平面气压、地表平均气温、比湿、相对湿度等。有研究表明, 英国 Hadley 中心的海气耦合模式 (HadCM3) 对东亚地区模拟效果较好<sup>[19]</sup>, 因此本研究在 GCM 模式上选择 HadCM3, 同时基于泾河流域快速发展的趋势, 选择 IPCC 在 2000 年温室气体排放情景 (SRES)<sup>[18]</sup> 中提出的 A2 (高温室气体排放情景) 和 B2 (低温室气体排放情景) 两种情景。HadCM3 在 A2 和 B2 排放情景下的数据, 包括两个时段: 1961—2000 年和 2011—2099 年, 其中 1961—2000 年的  $ET_0$ 、NCEP 数据用于当前时段统计关系的建立, 而 2011—2099 年的 HadCM3 数据用来基于建立的统计关系预测 21 世纪的  $ET_0$  变化。

### 1.2 $ET_0$ 计算与预测

采用联合国粮农组织 (FAO, Food and Agriculture Organization) 推荐的 Penman-Monteith 公式<sup>[20]</sup> 计算  $ET_0$ 。基于 15 个气象站点的日数据计算日序列  $ET_0$ , 然后合并计算得到月值和年值。将计算所得的泾河流域 1961—2005 年  $ET_0$  数据与实测蒸发皿数据进行对比(图 2), 可以看出利用 P-M 公式计算出的  $ET_0$  与蒸发皿数据吻合程度较好。

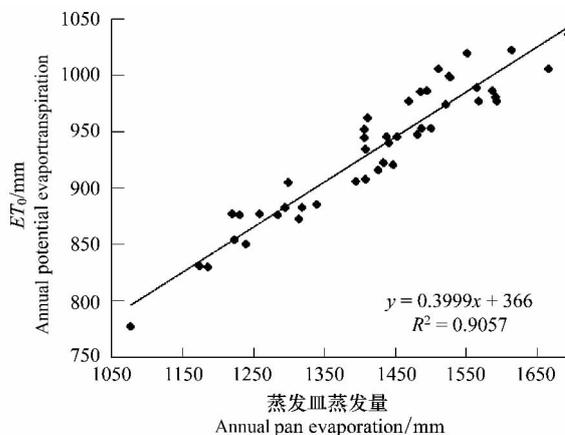


图 2 1961—2005 年泾河流域蒸发皿蒸发量同  $ET_0$  的比较

Fig. 2 Comparison of annual pan evaporation and  $ET_0$  from 1961 to 2005

基于 SDSM (Statistical Downscaling Model, version 4.2) 预测未来  $ET_0$ 。具体操作主要包括 3 个步骤:

(1) 预报因子选择 选择  $ET_0$  作为预报量, 从 26 个大气环流变量中选择预报因子, 通过偏相关系数、校准和验证效果等选择最佳预报因子组合。

(2) 模型率定与验证 将 1961—2000 年的 3 类

数据分成 1961—1980 年和 1981—2000 年 2 个时段, 分别用于模型的率定与验证。使用 1961—1980 年数据, 基于选定的预报因子与预报变量, 建立实测数据与 NCEP 再分析数据的统计关系, 完成模型校准。将建立的统计关系, 应用于 1981—2000 年的 NCEP 再分析数据, 生成预报量在该时段的日序列, 对比分析模拟序列与实测序列间的吻合程度。

(3) 预测未来  $ET_0$ 。针对未来 3 个时段(21 世纪 20 年代, 50 年代, 80 年代), 将 HadCM3 输出的大气环流因子输入 SDSM 建立的统计模型中, 生成各个站点的未来日序列数据, 分析未来  $ET_0$  变化趋势。

按上述步骤对每个站点进行重复操作, 即可得到全流域的  $ET_0$  变化趋势预测结果。

运用决定系数  $D^{[20]}$  和模型效率系数  $E^{[21]}$  对 SDSM 降尺度效果进行评估, 其中:

$$D = \frac{\sum (q_c - \bar{q}_c)^2 - \sum (q_c - q_{est})^2}{\sum (q_c - \bar{q}_c)^2}$$

$$E = 1 - \frac{\sum (q_c - q_e)^2}{\sum (q_c - \bar{q}_c)^2}$$

式中,  $q_c$  为实测值,  $\bar{q}_c$  为实测值的平均值,  $q_{est}$  为线性回归模型拟合值,  $q_e$  为模拟值。 $D$  和  $E$  取值范围为 0—1, 越接近 1, 表示模拟精度越高。

### 1.3 $ET_0$ 时空分析

运用反距离权重插值法分析当前和未来  $ET_0$  的空间分布。运用 Mann-Kendall 方法对  $ET_0$  年际变化进行单调趋势和突变分析。使用  $t$  检验分析未来  $ET_0$  变化的显著性, 比较其与基准期  $ET_0$  差异的显著程度, 使用 0.05 的显著性水平。上述操作, 均使用各站点数据进行。

## 2 结果与分析

### 2.1 1961—2005 年 $ET_0$ 空间分布与时间变化

1961—2005 年泾河流域  $ET_0$  年均值为 934.6 mm。由 1961—2005 年  $ET_0$  的空间分布(图 3) 可以看出, 流域大部分地区的年均  $ET_0 > 910$  mm/a, 低值出现在流域西南部( $< 870$  mm/a), 高值则出现在东南及北部少部分地区( $> 970$  mm/a)。

泾河流域  $ET_0$  在 1961—2005 年间不断波动, 最小值和最大值分别出现在 1964 年和 1995 年, 总体上仅具有一个不显著的上升趋势(图 4)。利用

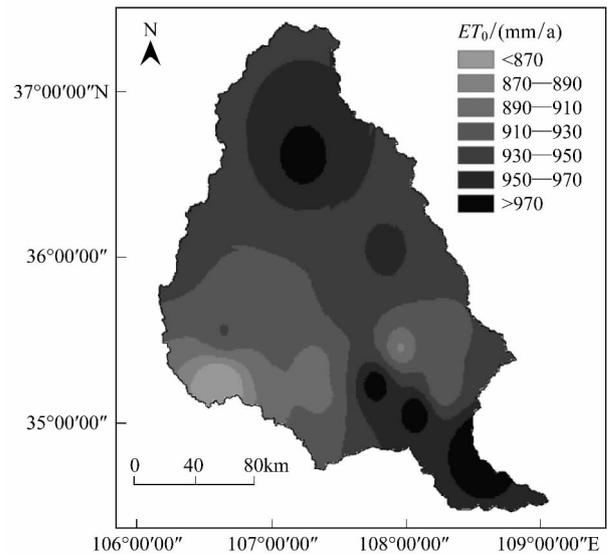


图 3 1961—2005 年泾河流域  $ET_0$  的空间分布

Fig.3 The spatial distribution of annual average  $ET_0$  in the Jinghe watershed during 1961—2005

Mann-Kendall 法对流域 15 个站点的年  $ET_0$  进行趋势检验, 得出 15 个气象站点中 5 个站点具有上升趋势, 10 个站点具有下降趋势, 但具有显著上升和显著下降趋势的站点均只有 1 个。从突变检验的结果(图 4) 来看,  $ET_0$  在 1978 年发生减少的突变, 而进入 20 世纪 90 年代以后又呈不断增加的趋势。

泾河流域 1961—2005 年  $ET_0$  的年内分布随月份变化呈单峰曲线变化。 $ET_0$  自 1 月开始快速上升, 在 6 月达到最大, 之后逐渐减小, 12 月出现最小值。 $ET_0$  的季节分布为夏季  $>$  春季  $>$  秋季  $>$  冬季。春夏秋冬  $ET_0$  分别占多年平均  $ET_0$  的 30.7%、41.8%、17.5% 和 9.8%。高温低湿, 强辐射, 长日照, 与夏季  $ET_0$  高值的形成密切相关。

### 2.2 2011—2099 年的 $ET_0$ 趋势预测

#### 2.2.1 SDSM 降尺度效果评估

由于降尺度的各环节中存在一些不确定性, 故非常必要对统计降尺度模型的效果进行评估, 从而为未来  $ET_0$  预测的可靠性提供参考。由泾河流域  $ET_0$  计算值与模拟值的日序列散点图(图 5), 可以看出, 线性回归的斜率和决定系数均接近 1; 率定期和验证期的模型效率系数分别为 0.76 和 0.82。因此, 根据决定系数和模型效率系数对模拟精度的评定标准, 认为 SDSM 对流域  $ET_0$  的降尺度效果较好, 且在泾河流域具有较好的适用性, 可用于该流域未来  $ET_0$  的降尺度预测, 预测结果具有一定的可靠性。

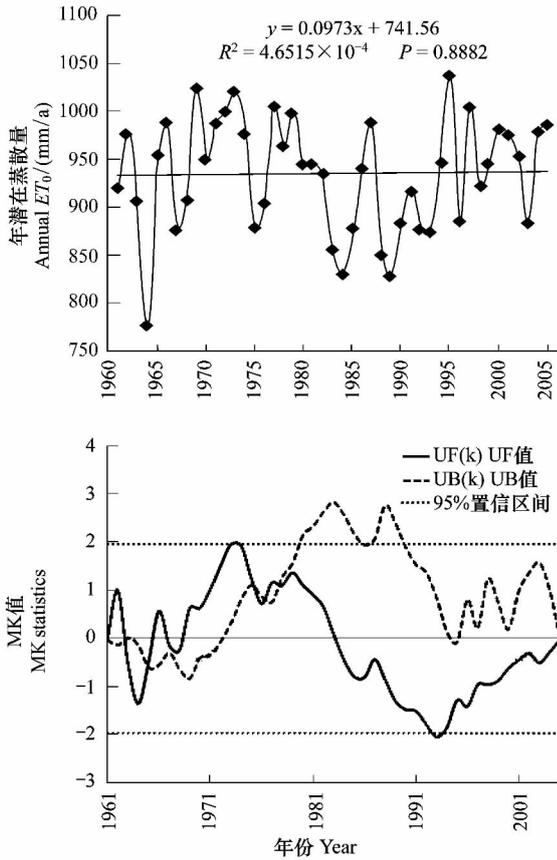


图4 1961—2005年泾河流域年 $ET_0$ 的变化趋势及突变情况  
 Fig.4 The temporal trend and abrupt change of Annual  $ET_0$  in the Jinghe watershed during 1961—2005

2.2.2 21世纪 $ET_0$ 的空间分布

未来3个时期泾河流域 $ET_0$ 的空间分布在A2和B2情景下基本相似,故仅给出 $ET_0$ 在21世纪80年代时期B2情景下变化的空间分布(图6)。可以看出,未来流域内 $ET_0$ 将普遍增大,但增幅存在空间变异;东部区域增幅最大,到21世纪80年代 $ET_0$ 将普遍增加12%以上;西部 $ET_0$ 增幅相对较小,特别是西南部地区增幅最小(<3%)。1961—2005年流域北部属于 $ET_0$ 高值区,而此区未来 $ET_0$ 增幅较小,将导致高值区逐渐集中到流域的东南部。因此,泾河流域21世纪 $ET_0$ 的空间分布将基本保持现有模式,但区域差异将随时间的推移不断增大。

2.2.3 21世纪 $ET_0$ 的时间变化

21世纪泾河流域 $ET_0$ 总体上在两种排放情景下均显著上升,2049年开始呈现显著上升趋势,2061年发生突变(图7),但A2情景下 $ET_0$ 的变化速度较B2情景大,分别为1.9 mm/a和0.9 mm/a。同时趋势检验结果表明,13个站点(总数15个)的 $ET_0$ 在

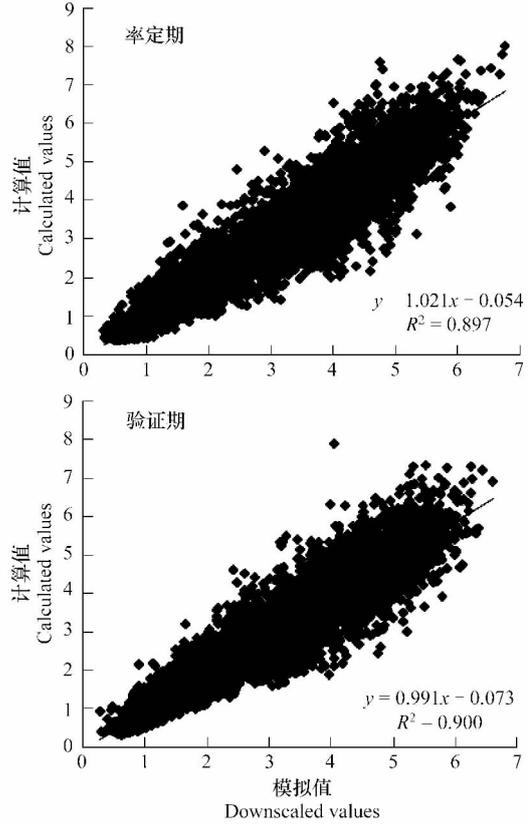


图5 泾河流域率定期及验证期日 $ET_0$ 计算与模拟值比较  
 Fig.5 Comparison of daily  $ET_0$  between calculated and downscaled series of Jinghe watershed during calibration and validation period

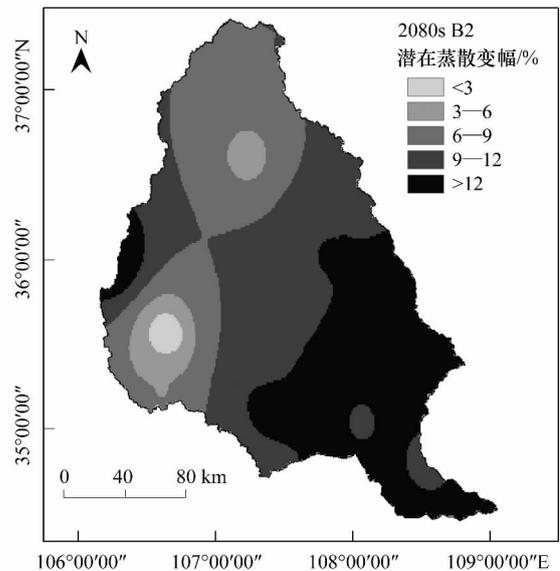


图6 B2情景下21世纪80年代泾河流域 $ET_0$ 变化的空间分布  
 Fig.6 The spatial distribution of potential evapotranspiration change of Jinghe watershed in 2080s under the B2 scenario

A2 和 B2 情景下未来 3 个时期均显著增加, 1 个站点 (甘肃平凉) 不显著, 1 个站点(甘肃环县) A2 情景下变化显著而 B2 情景下不显著。可见, 泾河流域 21 世纪  $ET_0$  的上升趋势具有普遍性。

从泾河流域未来 3 个时期(21 世纪 20、50、80 年代) 各月  $ET_0$  较基准期的变化(图 8), 可以看出, 不论是 A2 还是 B2 情景下, 增幅最高的月份均为 8 月。

而对于增幅最低月份, A2 情景下为 12 月, B2 情景下则为 2 月。除 A2 情景下的 21 世纪 20 年代和 B2 情景下的 21 世纪 20 年代, 80 年代增幅最大的季节为春季外, B2 情景下 21 世纪 50 年代及 A2 情景下的 21 世纪 50 年代和 21 世纪 80 年代为夏季增幅最大, 也就是说, 泾河流域 21 世纪的  $ET_0$  增加与夏季  $ET_0$  的贡献密切相关。

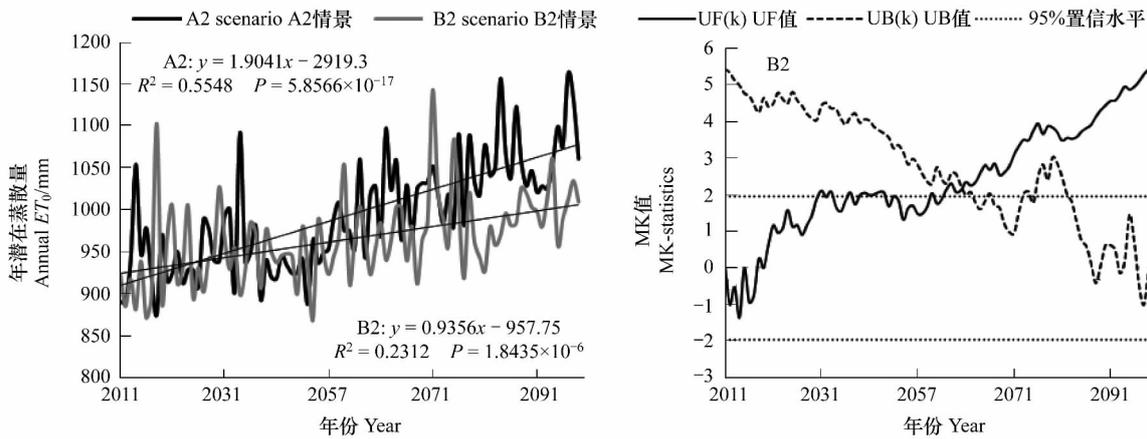


图 7 泾河流域 2011—2099 年 A2、B2 情景下的年  $ET_0$  变化及 B2 情景下未来  $ET_0$  的突变情况

Fig.7 Temporal change of annual  $ET_0$  under the two emission scenarios A2 and B2 from 2011 to 2099 and the abrupt of future  $ET_0$  under B2 scenario in the Jinghe watershed

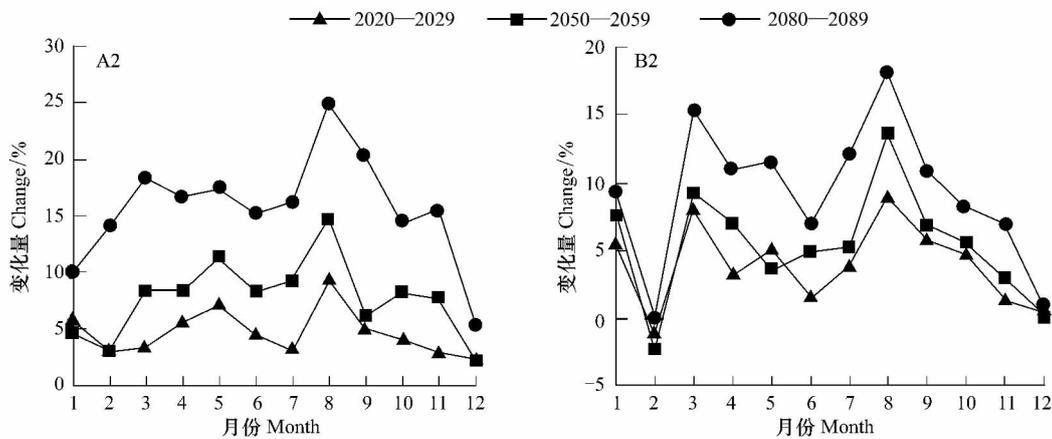


图 8 泾河流域未来 3 个时期的月  $ET_0$  相较于基准期的变化情景

Fig.8 Scenarios in the change of potential evapotranspiration in the Jinghe watershed in the 3 future periods compared with reference period( percentage difference)

### 3 讨论

基于 2000 年以前数据的相关研究发现全国绝大多数流域和西北地区的蒸发量均呈减少趋势<sup>[1, 21-24]</sup>, 但 Liu 等基于 1961—2006 年和李志基于 1961—2009 年的  $ET_0$  数据发现黄土高原多数站点的  $ET_0$  显著增大<sup>[25-26]</sup>。此种差异可能主要由研究时段

的选择导致。本研究 1961—2005 年泾河流域  $ET_0$  的变化趋势与基于最新数据进行分析的黄土高原的结果<sup>[26]</sup> 相似。上述结果表明, 尽管由于数据可得性, 本研究仅使用 1961—2005 年的数据对当前时段  $ET_0$  进行分析, 但相关研究结果是可信的。21 世纪泾河流域  $ET_0$  的变化趋势与黄土高原<sup>[27]</sup> 及渭河流域<sup>[28]</sup> 的相关研究结果一致。

预测的  $ET_0$  具有广泛的用途,例如结合降水使用干旱指数(Aridity index,  $AI = ET_0/P$ ),可以评估区域的干湿状况。基于降尺度预测的  $ET_0$  和同时预测的降水变化(结果未给出),发现泾河流域 21 世纪干旱指数在 A2 和 B2 情景下都呈显著的增大趋势(图 9),表明泾河流域 21 世纪可能受干旱威胁更加严重,且 21 世纪后半叶干旱最为严重。按照干旱指数对干湿状态的界定(湿润:  $0.375 \leq AI < 0.75$ ; 半湿润:

$0.75 \leq AI < 2$ ; 半干旱:  $2 \leq AI < 5$ ; 干旱:  $5 \leq AI < 12$ )<sup>[29]</sup>, 1961—2005 年泾河流域虽属于半湿润半干旱的过渡区域,但大部区域是半湿润地区(图 10); 然而即使是估算比较保守的 B2 情景下,泾河流域 21 世纪 80 年代已经基本全部变为半干旱区。可见,泾河流域 21 世纪的干旱状况会随时间加剧,同时受影响区域会不断扩展,这必然会影响该区的农业生产和生态建设,需提前采取措施减缓这些不利影响。

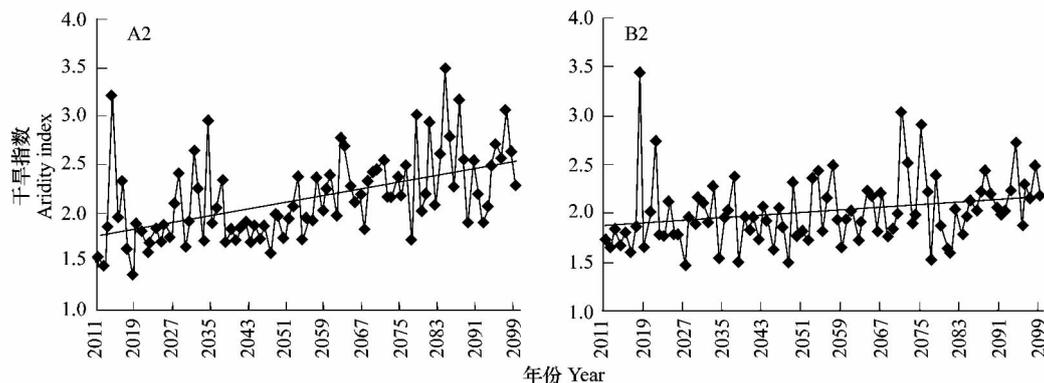


图 9 SDSM 降尺度预测下泾河流域 21 世纪的干旱指数

Fig.9 The aridity index of 21<sup>st</sup> century in the Jinghe watershed using statistical downscaling projection

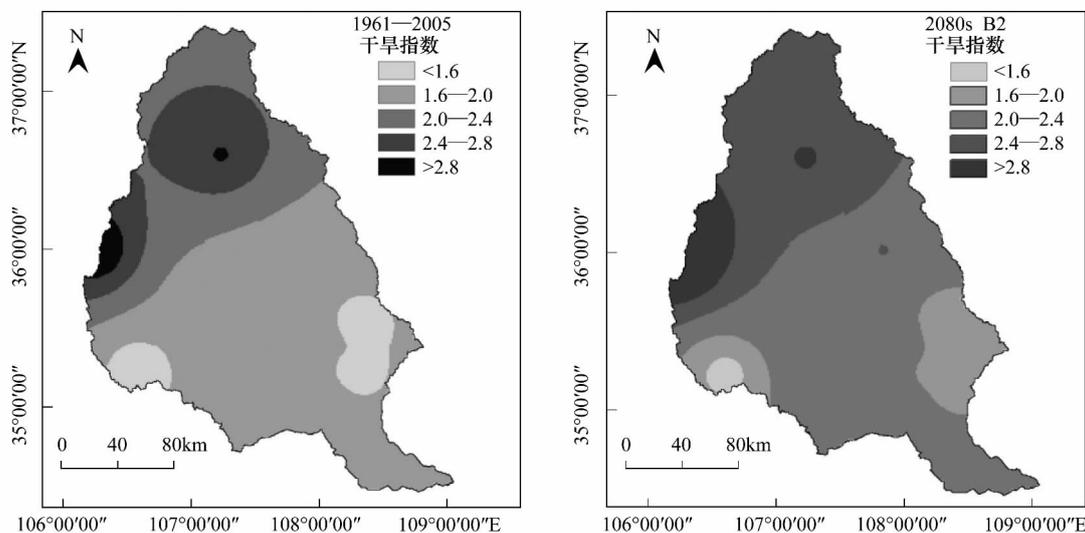


图 10 泾河流域 1961—2005 年干旱指数及 B2 情景下 21 世纪 80 年代干旱指数的空间分布

Fig.10 The distribution of aridity index in current period (1961—2005) and 2080s under B2 scenario in the Jinghe watershed

为降低气候预测的不确定性,通常使用多个 GCM 在多种排放情景下的数据进行相关研究。由于数据可得性,本研究只采用了 HadCM3 这一模式,但相关研究表明 HadCM3 在中国具有较好的适用性<sup>[30-32]</sup>,因此可在一定程度上降低 GCM 带来的不确定性。降尺度方法也是不确定性的来源,特别

是使用 SDSM 进行降水预测时效果往往较差,但研究表明 SDSM 在温度和蒸散发等方面的降尺度效果较好<sup>[27,31]</sup>,这从本研究中的降尺度效果评估也能反映出来。基于上述不确定性,需在其他 GCM 预报因子能够获取时继续开展深入研究,对本研究结果进行验证。

#### 4 结论

本研究在分析泾河流域 1961—2005 年  $ET_0$  的时空特征的基础上,应用 SDSM 统计降尺度模型基于 HadCM3 在 A2、B2 情景下的数据对泾河流域 21 世纪的  $ET_0$  进行了预测。结果表明,1961—2005 年泾河流域  $ET_0$  年均值为 934.6 mm; 空间分布上,  $ET_0$  自东部向西南方向递减; 时间变化上, 呈不显著的上升趋势。21 世纪泾河流域  $ET_0$  将普遍增长, 空间分布将基本保持现有模式, 但区域差异将随时间推移不断增大;  $ET_0$  总体上处于显著上升趋势。 $ET_0$  的变化将加剧泾河流域的干旱状况, 导致水资源短缺, 威胁该区的农业生产和生态建设, 因此, 需提前采取应对措施。

#### References:

- [1] Gao G, Chen D L, Ren G Y, Chen Y, Liao Y M. Trend of potential evapotranspiration over China during 1956 to 2000. *Geographical Research*, 2006, 25(3): 378–387.
- [2] Peterson T C, Golubev V S, Groisman P Y. Evaporation losing its strength. *Nature*, 1995, 377(6551): 687–688.
- [3] Brutsaert W, Parlange M B. Hydrologic cycle explains the evaporation paradox. *Nature*, 1998, 396(6706): 30–30.
- [4] Yao Y B, Wang Y R, Li Y H, Zhang X Y. Climate warming and drying and its environmental effects in The Loess Plateau. *Resources Science*, 2005, 27(5): 146–152.
- [5] Chen C C, Xie G D, Zhen L. Characters of precipitation variation in Jinghe Watershed. *Resource Science*, 2007, 29(2): 172–177.
- [6] Li Z, Liu W Z, Zheng F L. Trends of extreme temperature events in Jinghe Watershed during 1965—2005. *Scientia Geographica Sinica*, 2010, 30(3): 469–474.
- [7] Li Z, Liu W Z, Zheng F L. Analyzing variation trends in extreme precipitation events in the Jing River watershed during 1965—2005. *Resources Science*, 2010, 32(8): 1527–1532.
- [8] Chen C, Luo J G, Xie J C, Xiao J. Trend and characters of annual runoff in Jinghe River for last 80 years. *Yellow River*, 2013, 35(1): 26–28, 38–38.
- [9] Cheng G D, Wang G X. Changing trend of drought and drought disaster in northwest China and countermeasures. *Earth Science Frontiers*, 2006, 13(1): 3–14.
- [10] Yang X L, Wang L N. Variation characteristics of reference crop evapotranspiration of typical stations in upper basin of the Jinghe River in recent 45 years. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2012, 30(6): 238–242.
- [11] Wang P, Qiu G Y, Yin J, Xiong Y J, Xie F. Spatial Distribution and temporal trend of temperature and pan evaporation in Jinghe River Basin. *Arid Meteorology*, 2008, 26(1): 17–22.
- [12] Zhang S L, Yu P T, Wang Y H, Zhang H J, Valentina K, Huang S C, Xiong W, Xu L H. Estimation of actual evapotranspiration and its component in the upstream of Jinghe Basin. *Acta Geographica Sinica*, 2011, 66(3): 385–395.
- [13] Zhang S L, Yu P T, Zhang H J, Gao W, Wang Y H. Impact of climate change on the hydrological process in medium scale basin of arid areas. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2013, 27(10): 70–74.
- [14] Li Z, Zhao X N. Spatiotemporal analysis of meteorological elements on the Loess Plateau during 1961—2009. *Journal of Natural Resources*, 2013, 28(2): 287–299.
- [15] IPCC. Special Report on Emissions Scenarios. Cambridge: Cambridge University Press, 2000.
- [16] Willby R L, Wigley T M L. Downscaling general circulation model output: A review of methods and limitations. *Progress in Physical Geography*, 1997, 21(4): 530–548.
- [17] Fan L J, Fu C B, Chen D L. Review on creating future climate change scenarios by statistical downscaling techniques. *Advance in Earth Science*, 2005, 20(3): 320–329.
- [18] IPCC. Emissions scenarios, special report of the intergovernmental panel on climate change. Cambridge: Cambridge University Press, 2000.
- [19] Shi X Y, Xu X D, Xu Y. Comparison of temperature between six hundreds stations in China and output of IPCC models. *Meteorological Monthly*, 2005, 31(7): 49–53.
- [20] Allen R G, Pereira L S, Raes D, Smith M. Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements. FAO Irrigation and Drainage Paper No 56, Rome, 1998.
- [21] Ding Y H, Ren G Y, Shi G Y, Gong P, Zheng X H, Zhai P M, Zhang D E, Zhao Z C, Wang S W, Wang H J, Luo Y, Chen D L, Gao X J, Dai X S. National assessment report on climate change (I): Climate change in China and the future trend. *Advances in Climate Change Research*, 2006, 2(1): 3–8.
- [22] Xie X Q, Wang L. Changes of potential evaporation in Northern China over the past 50 years. *Journal of Natural Resources*, 2007, 22(5): 683–691.
- [23] Xu C Y, Gong L B, Jiang T, Chen D L, Singh V P. Analysis of spatial distribution and temporal trend of reference evapotranspiration and pan evaporation in Changjiang (Yangtze River) catchment. *Journal of Hydrology*, 2006, 327(1/2): 81–93.
- [24] Wang P X, Yang J H, Zhang Q, He J H, Wang D M, Lu D R. Climate change characteristic of northwest China in recent half century. *Advances in Earth Science*, 2007, 22(6): 649–656.
- [25] Liu Q, Yang Z F, Cui B S, Tao S. The temporal trends of reference evapotranspiration and its sensitivity to key

- meteorological variables in the Yellow River Basin, China. *Hydrological Processes*, 2010, 24( 15): 2171–2181.
- [26] Li Z. Spatiotemporal variations in the reference crop evapotranspiration on the Loess Plateau during 1961–2009. *Acta Ecologica Sinica*, 2012, 32( 13): 4139–4145.
- [27] Li Z, Zheng F L, Liu W Z. Spatiotemporal characteristics of reference evapotranspiration during 1961–2009 and its projected changes during 2011–2099 on the Loess Plateau of China. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2012, 154–155: 147–155.
- [28] Zuo D P, Xu Z X, Liu Z F. Comparison of temperature-based methods for estimating potential evapotranspiration in the arid region of Northwest China. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2009, 23( 10): 123–131.
- [29] Arora V K, Tsang C F. The use of aridity index to assess climate change effect on annual runoff. *Journal of Hydrology*, 2002, 265 ( 1/4): 164–177.
- [30] Liu L L, Liu Z F, Xu Z X. Trends of climate change for the upper-middle reaches of the Yellow River in the 21<sup>st</sup> century. *Advances in Climate Change Research*, 2008, 4( 3): 167–172.
- [31] Huang J X, Xu Z X, Liu Z F, Zhao F F. Analysis of future climate change in the Taihu Basin using statistical downscaling. *Resources Sciences*, 2008, 30( 12): 1811–1817.
- [32] Chu J T, Xia J, Xu C Y. Suitability analysis of SDSM model in the Haihe River Basin. *Resources Sciences*, 2008, 30 ( 12): 1825–1832.
- [ 9 ] 程国栋,王根绪. 中国西北地区的干旱与旱灾——变化趋势与对策. *地学前缘*, 2006, 13( 1): 3–14.
- [10] 杨小利,王丽娜. 泾河上游典型站近 45 年参考作物蒸散量变化特征. *干旱地区农业研究*, 2012, 30( 6): 238–242.
- [11] 王佩,邱国玉,尹婧,熊育久,谢芳. 泾河流域温度与器皿蒸发量时空特征及变化趋势. *干旱气象*, 2008, 26( 1): 17–22.
- [12] 张淑兰,于澎涛,王彦辉,张海军,Valentina K, Huang S C, 熊伟,徐丽宏. 泾河上游流域实际蒸散量及其各组分的估算. *地理学报*, 2011, 66( 3): 385–395.
- [13] 张淑兰,于澎涛,张海军,高娃,王彦辉. 气候变化对干旱缺水地区中尺度流域水文过程的影响. *干旱区资源与环境*, 2013, 27( 10): 70–74.
- [14] 李志,赵西宁. 1961—2009 年黄土高原气象要素的时空变化分析. *自然资源学报*, 2013, 28( 2): 287–299.
- [17] 范丽军,符淙斌,陈德亮. 统计降尺度法对未来区域气候变化情景预估的研究进展. *地球科学进展*, 2005, 20( 3): 320–329.
- [19] 施小英,徐祥德,徐影. 中国 600 个站气温和 IPCC 模式产品气温的比较. *气象*, 2005, 31( 7): 49–53.
- [21] 丁一汇,任国玉,石广玉,宫鹏,郑循华,翟盘茂,张德二,赵宗慈,王绍武,王会军,罗勇,陈德亮,高学杰,戴晓苏. 气候变化国家评估报告( I): 中国气候变化的历史和未来趋势. *气候变化研究进展*, 2006, 2( 1): 3–8.
- [22] 谢贤群,王菱. 中国北方近 50 年潜在蒸发的变化. *自然资源学报*, 2007, 22( 5): 683–691.
- [24] 王鹏祥,杨金虎,张强,何金海,王德民,陆登荣. 近半个世纪来中国西北地面气候变化基本特征. *地球科学进展*, 2007, 22( 6): 649–656.
- [26] 李志. 黄土高原 1961—2009 年参考作物蒸散量的时空变异. *生态学报*, 2012, 32( 13): 4139–4145.
- [28] 左德鹏,徐宗学,刘兆飞. 基于气温的潜在蒸散发量估算方法在我国西北干旱地区的应用比较. *干旱区资源与环境*, 2009, 23( 10): 123–131.
- [30] 刘绿柳,刘兆飞,徐宗学. 21 世纪黄河流域上中游地区气候变化趋势分析. *气候变化研究进展*, 2008, 4( 3): 167–172.
- [31] 黄俊雄,徐宗学,刘兆飞,赵芳芳. 统计降尺度法分析太湖流域未来气候变化情景. *资源科学*, 2008, 30( 12): 1811–1817.
- [32] 褚健婷,夏军,许崇育. SDSM 模型在海河流域统计降尺度研究中的适用性分析. *资源科学*, 2008, 30( 12): 1825–1832.

## 参考文献:

- [ 1 ] 高歌,陈德亮,任国玉,陈峪,廖要明. 1956—2000 年中国潜在蒸散量变化趋势. *地理研究*, 2006, 25( 3): 378–387.
- [ 4 ] 姚玉璧,王毅荣,李耀辉,张秀云. 中国黄土高原气候暖干化及其对生态环境的影响. *资源科学*, 2005, 27( 5): 146–152.
- [ 5 ] 陈操操,谢高地,甄霖. 泾河流域降雨量变化特征分析. *资源科学*, 2007, 29( 2): 172–177.
- [ 6 ] 李志,刘文兆,郑粉莉. 1965—2005 年泾河流域极端温度事件变化特征. *地理科学*, 2010, 30( 3): 469–474.
- [ 7 ] 李志,刘文兆,郑粉莉. 1965 年至 2005 年泾河流域极端降水事件的变化趋势分析. *资源科学*, 2010, 32( 8): 1527–1532.
- [ 8 ] 陈晨,罗军刚,解建仓,肖洁. 泾河流域近 80 a 径流变化趋势及特征分析. *人民黄河*, 2013, 35( 1): 26–28, 38–38.