

基于 PenPan 模型中国蒸发皿蒸发量的时空变化及成因分析

朱晓华^{1,3}, 徐芳^{1,3}, 姬祥祥^{1,3}, 毛鑫^{1,3}, 周翔^{1,3}, 冯浩^{2,3}, 何建强^{1,3}

(1. 西北农林科技大学旱区农业水土工程教育部重点实验室, 陕西 杨凌 712100; 2. 中国科学院水利部水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100; 3. 西北农林科技大学中国旱区节水农业研究院, 陕西 杨凌 712100)

摘要: 蒸发皿蒸发量是衡量大气蒸发能力的重要指标。为了研究中国地区蒸发皿蒸发量的时空变化规律和成因, 利用全国 751 个站点 1961–2017 年的逐日气象观测资料(平均温度、风速、相对湿度、日照时数), 基于 PenPan 模型对 20 cm 蒸发皿蒸发量进行估算。对中国地区 57 a 的气象数据和 PenPan 模型模拟结果进行趋势分析, 探究影响蒸发皿蒸发量的主导气象因素。结果发现: 在 1961–1993 年期间, 中国地区存在“蒸发悖论”现象, 影响蒸发皿蒸发量的主导气象因素为风速; 1994–2017 年“蒸发悖论”现象消失, 此时主导因素为饱和水汽压差; 两阶段相比, 空气温度对蒸发的作用增大, 而风速的作用减小。春夏秋冬 4 个季节, 蒸发量在空间上差异较大。辐射项蒸发量的夏季最大值在西北地区, 其余季节在华南地区; 动力项蒸发量冬季最大值在华南地区, 其余季节在西北地区; 随着季节推移, 总蒸发量最大区域由西北转移到华南地区。根据蒸发皿蒸发量的时空变化情况, 可以得出西北和华南地区需要根据该地区蒸发量的季节变化合理调配水资源。

关键词: 气象要素; 蒸发皿蒸发量; PenPan 模型; 时空变化; 成因分析

中图分类号: S161 文献标识码: A

Spatiotemporal Variation and Causes of Pan Evaporation in China Based on PenPan Model

ZHU Xiao-hua^{1,3}, XU Fang^{1,3}, JI Xiang-xiang^{1,3}, MAO Xin^{1,3},
ZHOU Xiang^{1,3}, FENG Hao^{2,3}, HE Jian-qiang^{1,3}

(1. Key Laboratory for Agricultural Soil and Water Engineering in Arid Area of Ministry of Education, Yangling 712100, Shaanxi Province, China; 2. Institute of Water and Soil Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling 712100, Shaanxi Province, China; 3. Institute of Water-saving Agriculture in Arid Area of China, Northwest A&F University, Yangling 712100, Shaanxi Province, China)

Abstract: Pan evaporation (E_{pan}) is an important indicator to measure the atmospheric evaporation demand. Studying the pan evaporation in China is beneficial to explore its hydrological cycle and provide guidance for the rational distribution of water resources. This study used daily weather observation data (average temperature, wind speed, relative humidity, and sunshine hours) of 751 stations nationwide from 1961 to 2017 to estimate the evaporation of 20 cm pan evaporation based on the PenPan model. This paper analyzed the trend of 57 years of meteorological data and PenPan model calculations in China to explore the dominant factors affecting E_{pan} . The results showed that: during the period from 1961 to 1993, there was a phenomenon of “evaporation paradox” in China, and the dominant factor affecting E_{pan} was wind speed; the phenomenon of “evaporation paradox” disappeared in 1994–2017, and the dominant factor was saturated water vapor pressure. Comparing the two stages, the effect of air temperature on evaporation increased while that of wind speed decreased. In the different seasons of spring, summer, autumn and winter, the amount of evaporation varied greatly in space. The summer maximum of radiation component was in northwest China, and the rest of the season was in south China. The maximum value of areodynamic component in winter was in southern China and the rest seasons were in northwest China. As the season went on, the region with the largest total evaporation had shifted from

收稿日期: 2018-11-08

基金项目: 陕西省科技统筹创新工程计划项目(2016KTZDNY03-06)。

作者简介: 朱晓华(1993-), 女, 硕士研究生, 主要从事蒸散发方面的研究。E-mail: Zhu_hua@nwfufu.edu.cn。

通讯作者: 何建强(1977-), 男, 教授, 主要从事农业节水灌溉和水土资源高效利用方面的研究。E-mail: jianqiang_he@nwsuaf.edu.cn。

northwest to southern China. The summer maximum of radiation evaporation was in northwestern China and the rest of the season was in southern China. According to the total evaporation, it can be concluded that the northwest region and the southern China need to reasonably allocate water resources according to the seasonal variation of evaporation in the region.

Key words: meteorological elements; E_{pan} ; PenPan model; spatiotemporal variation; analysis of the attribution

0 引言

蒸散发是水文循环过程中的关键环节,也是能量平衡的重要支出项^[1]。然而,蒸散发过程不可见且测量难度较大,一般通过实测和模型估计方法来确定,例如蒸发皿观测^[2]。蒸发皿蒸发量作为衡量大气蒸发能力的一个重要指标,对于监测气候和水文循环变化具有重要指示意义,也是衡量作物需水量、湖泊蒸发、陆地蒸发量的重要参数^[3]。2018年3月23日世界气象组织(WMO)发布了《2017年全球气候状况声明》:在2017年,全球平均气温较工业化前高出约1.1℃,2013–2017年全球平均温度达到了有记录以来的最高值^[4]。也有研究发现中国地区温度呈现上升趋势,在1961–2014年期间每10年温度增加0.24℃^[5]。因此,合理估算蒸发量,系统分析蒸发量的时空变化规律,对研究中国气候变化和水资源评价具有重要的意义,也对农业需水量管理、旱情监测以及水资源有效利用具有重要的应用价值^[6]。

随着全球气温上升,西班牙^[7]、伊朗^[8]等地区蒸发量呈现上升趋势,而墨西哥、印度地区蒸发量持续下降^[9,10],这与全球变暖可能导致蒸发潜力增加的猜测相矛盾,因此这种现象被称为“蒸发悖论”^[11]。中国的黄河地区、海河地区、黑河地区,也存在同样的现象^[12–14]。由于蒸发皿蒸发量的变化受多种因素共同影响,许多学者对其主导因素进行了研究:Michael L等人^[15]认为蒸发下降是由于云量和气溶胶增加,从而引起太阳总辐射下降,即太阳辐射是主导因素;Rayner等人^[16]发现风速下降是澳大利亚蒸发皿蒸发量下降的主导因素;印度地区相对湿度的增加和风速的下降是其参考作物蒸发量下降的原因^[17]。在中国地区:刘昌明等^[18]通过敏感系数得出全国范围内潜在蒸散发对气象因子的敏感性为:水汽压>最高气温>太阳辐射>风速>最低气温;曾燕等^[2]发现日照百分率下降导致太阳总辐射下降,这可能是近年来蒸发皿蒸发量下降的主要原因;祁添强等^[19]发现相对湿度是影响中国蒸发皿蒸发量变化的关键因子;刘敏等^[20]对中国地区通过完全相关系数法分析发现,气温日较差和平均风速的减小与蒸发皿蒸发量的减少具有最显著的相关性,是蒸发皿蒸发量减少的影响因子。由于研究年限和方法的差异,结果有所不同。

以上研究主要基于蒸发皿蒸发量的实测值和Penman-Monteith模型模拟,我国常规使用20cm(圆形)和E601(锥形)型蒸发皿,两种蒸发仪器的折算系数存在空间差异和时间变异性,两者转化较为复杂^[21];在中国地区有研究用Penman-Monteith模型来估算蒸发皿蒸发量,但其中存在一定的折算系数^[22]。不论是基于实测值还是Penman-Monteith模型,中间转化都增加了误差。PenPan模型是基于Class-A型蒸发皿建立的,目的是用来估算蒸发皿蒸发量,该模型在中国地区已有应用^[23–27],方法简单实用。故本研究采用PenPan模型对中国地

区蒸发皿蒸发量进行研究,旨在得出中国地区蒸发皿蒸发量的时空变化趋势及主导因素。

1 材料和方法

1.1 研究区域与数据来源

研究区内逐日气象数据来自中国气象局(<http://data.cma.cn/>)。在1961–2017年气象资料和蒸发皿观测值序列中,本研究选择相对完整的751个站点的数据进行分析(见图1)。数据主要包括平均温度(T_a)、相对湿度(RH)、日照时数(SD)、风速(u_2)和20cm蒸发皿蒸发量。为了分析蒸散发的季节性变化,将一年分为春(3–5月)、夏(6–8月)、秋(9–11月)、冬(12–次年2月)4个季节。

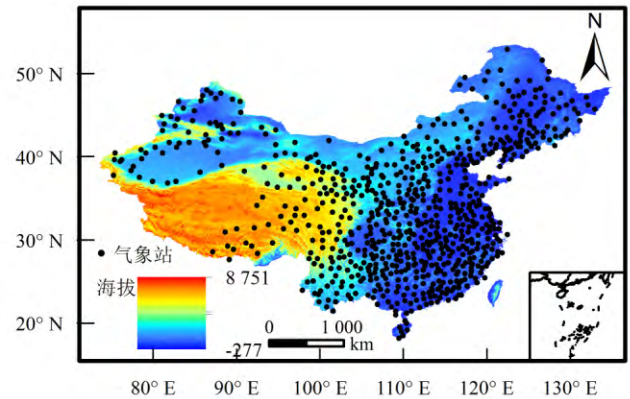


图1 研究区域气象站空间分布

Fig.1 Distribution of meteorological stations in study area

1.2 PenPan 模型

PenPan模型是基于Penman模型^[28]建立的。Rotstayn等^[29]于2006年将其进行改进,目的用来估算Class-A型蒸发皿蒸发量。在本研究中,我们运用修正后适合计算20cm蒸发皿蒸发量的PenPan模型,计算方法如下:

$$E_{PenPan} = \frac{\Delta}{\Delta + a\gamma} \frac{R_n}{\lambda} + \frac{a\gamma}{\Delta + a\gamma} f_q(u_2) vpd \quad (1)$$

式中: E_{PenPan} 为蒸发皿每天的蒸发量,mm/d; $\frac{\Delta}{\Delta + a\gamma} \frac{R_n}{\lambda}$ 为辐射项;

$\frac{a\gamma}{\Delta + a\gamma} f_q(u_2) vpd$ 为动力项; Δ 为饱和水汽压与温度曲线关系的斜率,kPa/℃; a 为风传输热量和水汽函数比值(取值为5)^[23]; γ 为干湿表常数,kPa/℃; R_n 为蒸发皿的净辐射,MJ/(m²·d); λ 为水的汽化潜热,2.45 MJ/kg; $f_q(u_2)$ 为风传输水汽函数^[30]; u_2 为2m高风速,m/s; vpd 为饱和水汽压和实际水汽压的差($vpd = e_s - e_a$ kPa),见详细计算^[26]。

1.3 模型评价

本研究采用RRMSE(Relative Root Mean Square Error)和

NSE (Nash-Sutcliffe Efficacy Coefficient) ^[31] 两个指标对 PenPan 模型在中国地区适用性进行评价。

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (E_{pan\ i} - E_{PenPan\ i})^2} \quad (2)$$

$$RRMSE = \frac{RMSE}{E_{pan}} \times 100\% \quad (3)$$

$$NSE = - \frac{\sum_{i=1}^n (E_{pan\ i} - E_{PenPan\ i})^2}{\sum_{i=1}^n (E_{pan\ i} - \overline{E_{pan}})^2} \quad (4)$$

式中: $RMSE$ 为均方根误差; $RRMSE$ 为相对均方根误差; $E_{pan\ i}$ 为第 i 个实测值; $E_{PenPan\ i}$ 为第 i 个模拟值; $\overline{E_{pan}}$ 为观测值的平均值; n 为数据个数。

一般认为 $RRMSE \leq 10\%$ 模拟结果优秀, $10\% < RRMSE \leq 20\%$ 认为模拟结果良好, $20\% < RRMSE \leq 30\%$ 认为模拟结果合理, $30\% < RRMSE \leq 40\%$ 认为模拟结果一般, 当 $RRMSE > 40\%$, 则认为模拟结果较差^[32]; NSE 为纳什系数($-\infty \sim 1$) , 越接近 1 , 效果越好。

1.4 趋势分析

为了量化近年来中国地区气候和蒸发皿蒸发量的变化情况, 对中国地区气象因素和蒸发量进行趋势分析。趋势分析方法利用 Mann-Kendall(M-K) 趋势分析方法^[33, 34] , M-K 趋势分析为非参数检验方法, 不需要样本遵循一定的分布, 异常值对结果影响较小, 适用于气象等非正态分布数据的趋势检验。Mann-Kendall 趋势检验方法, 具体如下:

$$S = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \text{sgn}(x_j - x_i) \quad (5)$$

$$\text{sgn}(x_j - x_i) = \begin{cases} +1 & \text{if } (x_j - x_i) > 0 \\ 0 & \text{if } (x_j - x_i) = 0 \\ -1 & \text{if } (x_j - x_i) < 0 \end{cases} \quad (6)$$

$$E(S) = 0 \quad (7)$$

$$\sigma^2 = \frac{n(n-1)(2n+5) - \sum_{p=1}^q t_p(t_p-1)(2t_p+5)}{18} \quad (8)$$

$$Z = \begin{cases} \frac{S-1}{\sigma} & \text{if } S > 0 \\ 0 & \text{if } S = 0 \\ \frac{S+1}{\sigma} & \text{if } S < 0 \end{cases} \quad (9)$$

式中: x_j, x_i 均为欲进行假设检验的随机变量; n 代表数据系列的长度; 当 $x_j - x_i$ 大于、等于或小于 0 时, sgn 的值分别为 +1、0、-1。当 $Z > 0$ 时, 为上升趋势; $Z < 0$ 时, 为下降趋势。检验显著性水平为 0.05 时 Z 的临界值为 ± 1.96 。

1.5 成因分析

蒸发皿蒸发量是多种气象因子综合作用的结果, 为了探究气象要素对蒸发皿蒸发量的敏感性, 找出影响中国地区蒸发皿蒸发量的主导因素。本研究采用多元线性回归, 先将数据标准化, 来探寻影响中国蒸发皿蒸发量的主导因素^[35]。

$$Y = a X_1 + b X_2 + c X_3 + d X_4 \quad (10)$$

$$\xi X_1 = |a| / (|a| + |b| + |c| + |d|) \quad (11)$$

式中: Y 为蒸发皿蒸发量标准化后的值; X_1, X_2, X_3, X_4 均为气象要素标准化后的值; a, b, c, d 为每个气象要素的相关系数; ξX_1 为 X_1 气象要素对 Y 的贡献。

2 结果与分析

2.1 PenPan 模型在中国地区适用性评价

本研究分析了月尺度的 20 cm 蒸发皿观测值和 PenPan 模型模拟值的相关性(图 2), 选取点数 $n = 351\ 859$, 其模拟值和观测值的相关系数为 0.96, R^2 (Coefficient of Determination) 为 0.97, $RMSE$ (Root Mean Square Error) 为每个月 28.03 mm。 $RRMSE$ 为 21.6%, NSE 为 0.90, 接近于 1, 说明 PenPan 模型在中国地区适用性良好。

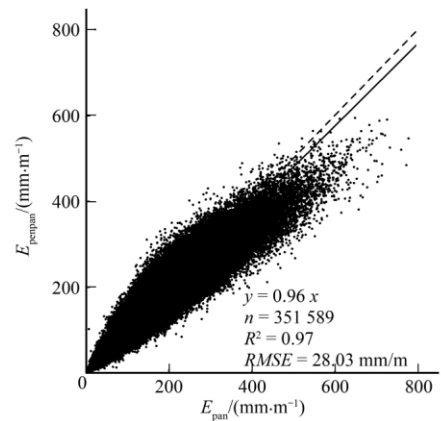


图 2 蒸发皿观测值 E_{pan} 和 PenPan 模型模拟结果比较

Fig. 2 Comparison of the observed and calculated

2.2 中国地区蒸发皿蒸发量年际变化趋势

图 3 为 1961-2017 年中国地区蒸发皿蒸发量年际变化情况。中国地区年际总蒸发量在 1 550 ~ 1 750 mm/a 之间, 在 1961-2017 年期间总蒸发量呈现先下降后上升的趋势。其中

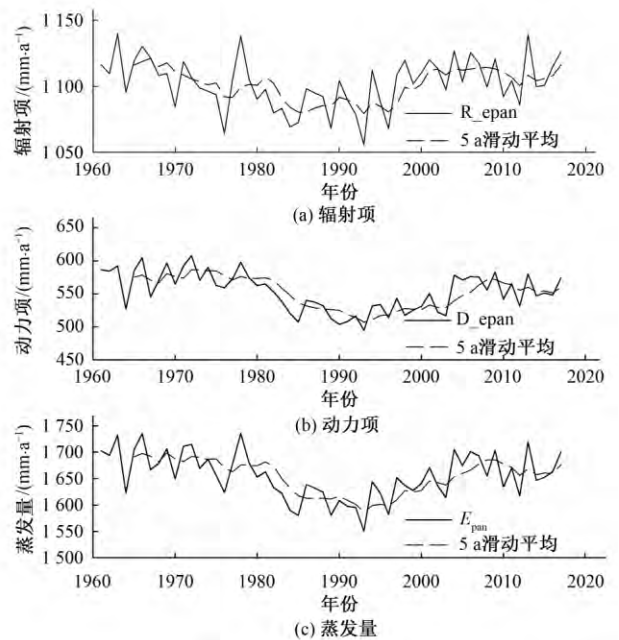


图 3 1961-2017 年中国地区蒸发皿蒸发量年际变化趋势
Fig.3 Long time series of pan evaporation changes trends over period of 1961 to 2017 in China

趋势发生变化的年份为 1993 年,在 1961-1993 年期间中国地区存在“蒸发悖论”现象,即随着空气温度升高蒸发量呈现下降趋势;在 1994-2017 年空气温度持续升高,“蒸发悖论”现象消失。辐射项和动力项变化趋势和总蒸发量变化趋势基本一致(图 3)。辐射项的变化范围为 1 050~1 140 mm/a,动力项的变化范围为 500~610 mm/a,因此辐射项对总蒸发量的贡献较大。

在 1961-2017 年,通过表 1 可知,温度和饱和水汽压差呈现显著上升趋势,太阳辐射和风速呈现显著下降趋势。在夏季辐射项和动力项都呈显著下降的趋势,说明夏季蒸发量下降是

整体处于下降趋势的关键季节。根据蒸发量整体的变化趋势,将 1961-2017 年划分为两个时段:1961-1993、1994-2017 年。在 1961-1993 年总蒸发皿蒸发量呈现显著下降趋势,春季和夏季下降显著,秋季和冬季下降趋势不显著。总蒸发皿蒸发量下降是辐射项和动力项的综合影响,其中动力项在四季中都呈显著下降趋势,辐射项在春季和夏季显著下降,秋季和冬季下降趋势不显著。在 1994-2017 年总蒸发量呈现显著上升趋势,其中春季和夏季上升趋势显著,辐射项变化不显著,动力项在夏季和冬季显著上升。

表 1 中国气象要素及蒸发量趋势分析

Tab.1 Trend analysis of meteorological elements and evaporation in China

时期	季节	温度	风速	净辐射	饱和水汽压差	辐射项	动力项	蒸发量
1961-2017	年	6.38*	-7.96*	-6.62*	5.49*	0.10	-2.32*	-1.45
	春	4.84*	-8.02*	-2.02*	4.89*	2.84*	-2.37*	0.21
	夏	4.56*	-7.21*	-6.59*	3.81*	-2.93*	-2.43*	-3.02*
	秋	4.91*	-7.52*	-4.23*	5.50*	0.56	-1.60	-0.43
	冬	4.43*	-6.88*	-3.06*	4.39*	1.78	-0.83	0.42
1961-1993	年	1.53	-5.50*	-4.66*	-0.70	-4.26*	-4.66*	-4.57*
	春	-0.57	-4.85*	-3.80*	-1.29	-2.68*	-4.35*	-3.86*
	夏	-1.16	-4.29*	-4.20*	-1.97*	-3.42*	-4.97*	-4.69*
	秋	0.45	-5.28*	-1.26	2.22*	-0.98	-2.22*	-1.81
	冬	2.56*	-5.50*	-2.12*	0.20	-0.14	-2.71*	-1.66
1994-2017	年	2.41*	-1.56	-1.52	3.39*	1.33	2.73*	2.41*
	春	2.73*	-2.87*	0.68	2.83*	1.99*	1.80	2.17*
	夏	2.45*	-0.77	-0.16	3.57*	1.19	3.01*	2.55*
	秋	1.99*	-0.86	-3.01*	1.24	-0.68	0.49	-0.16
	冬	0.54	0	-0.21	2.31*	0.72	2.08*	1.42

注: $Z \geq | \pm 1.96 |$; $p \leq 0.05$; * 为趋势显著。

2.3 中国气象要素和蒸发量空间变化

图 4 为 1961-2017 年中国地区气象要素的空间分布。中

国地区空气温度多年平均变化范围为 -5.03~25.23 °C,从北到南逐渐增大,越接近赤道温度越高,在青藏高原呈现较低的情

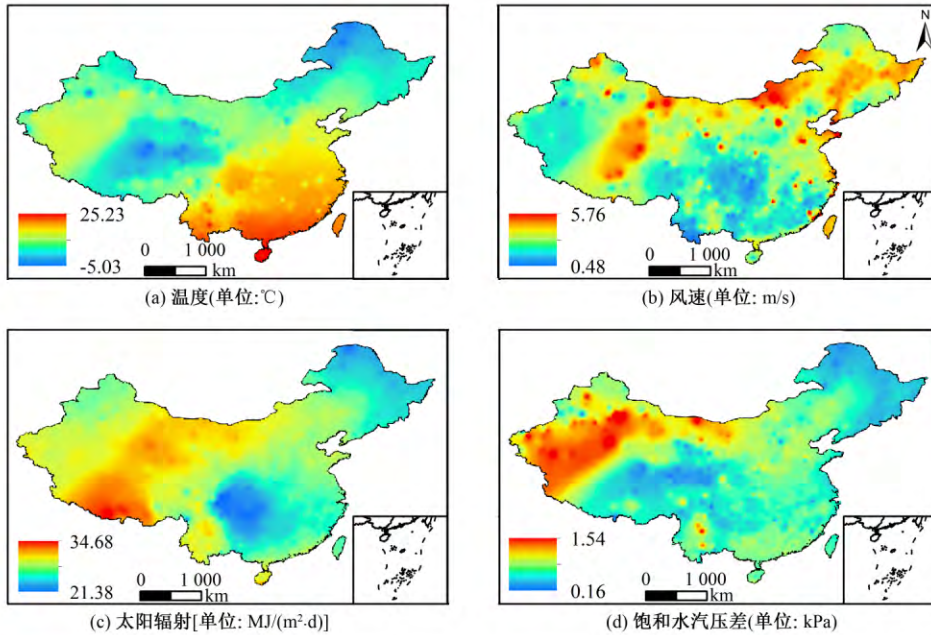


图 4 1961-2017 中国气象要素空间分布

Fig.4 Spatial distribution of meteorological elements in China from 1961 to 2017

况 这与青藏高原海拔高度有关; 中国地区风速多年平均变化范围为 0.48~5.76 m/s ,从北方到南方、从沿海到内陆, 风速逐渐减小; 中国地区太阳辐射多年平均值为 21.38~34.68 MJ/(m²·d) 在青藏高原西南地区最大, 四川盆地最小, 这与海拔高度有关, 海拔越高, 接受到的辐射越多; 中国地区饱和水汽压差多年平均为 0.16~1.54 kPa, 在中国西北地区较大, 这里沙漠较多, 如塔克拉玛干沙漠地区, 水分不足, 很难达到蒸发需要。

图 5 为 1961~2017 年中国地区蒸发皿蒸发量的空间分布。中国地区辐射项的多年平均范围为 611.29~1 727.79 mm/a, 动力项为 208.08~1 714.34 mm/a, 总蒸发量为 872.50~2 903.45

mm/a。辐射项和动力项在空间上分布差异巨大。辐射项蒸发量最大和最小相差 1 116.50 mm/a, 在海南、云南、广西和广东最大, 在东北地区较小。动力项蒸发量最大和最小相差 1 506.26 mm/a, 在内蒙古及新疆地区较大, 在中国南部和东北地区较小。总蒸发量最大和最小相差 2 030.95 mm/a, 表现出在内蒙古和新疆地区较大, 中国南部沿海地区次之, 东北地区最小, 表明中国地区蒸发量具有很大的区域差异。总蒸发量最大在西北地区, 但由于不同季节气象要素具有空间差异, 导致蒸发皿蒸发量具有时空变异性。

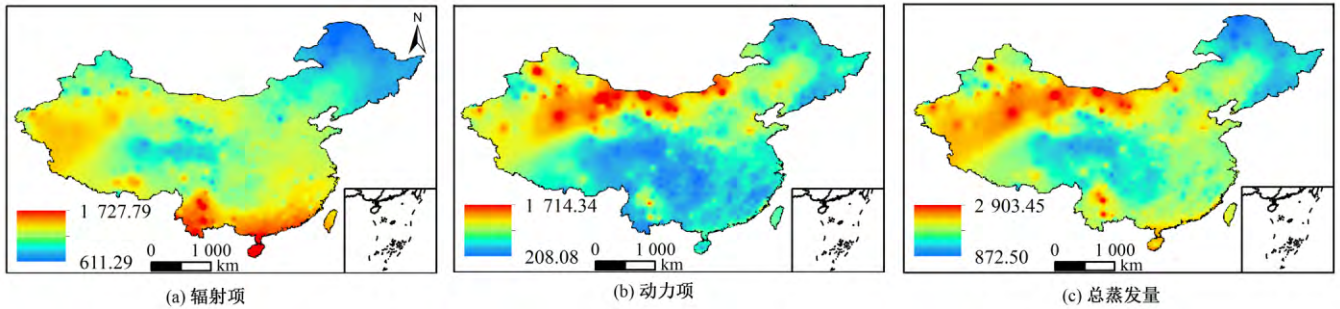


图 5 1961~2017 中国蒸发量空间分布(单位: mm/a)

Fig.5 Spatial distribution of evaporation in China from 1961 to 2017

2.4 中国蒸发皿蒸发量的季节变化

2.4.1 辐射项

图 6 为中国地区蒸发皿蒸发量辐射项空间分布。具体表现为: 春季蒸发量范围为 156.09~536.46 mm/a, 在云南和海南地区最大, 在东北地区蒸发量较小。夏季与春季相比, 蒸发量增大, 蒸发量的范围为 305.51~691.00 mm/a, 在内蒙古西部和新疆地区蒸发量最大, 在青藏高原西北部周围地区较小, 华东及以南地区变化差异较小。秋季蒸发量与夏季蒸发量相比, 空

间上整体呈下降趋势, 其范围为 77.50~405.11 mm/a, 在海南、云南、广西和广东地区蒸发量最大, 在新疆南部及青藏高原西南部地区蒸发量次之, 东北地区最小。冬季蒸发量为四个季节中最小的, 其范围为 7.04~298.28 mm/a, 在海南、云南、广西和广东蒸发量最大, 然后蒸发量向北逐渐减少。辐射项的蒸发量整体表现出夏季>春季>秋季>冬季。不同季节中, 除夏季辐射项最大值出现在中国西北部地区, 其余季节辐射项最大值的区域在中国南部地区, 东北地区蒸发量都比较小。

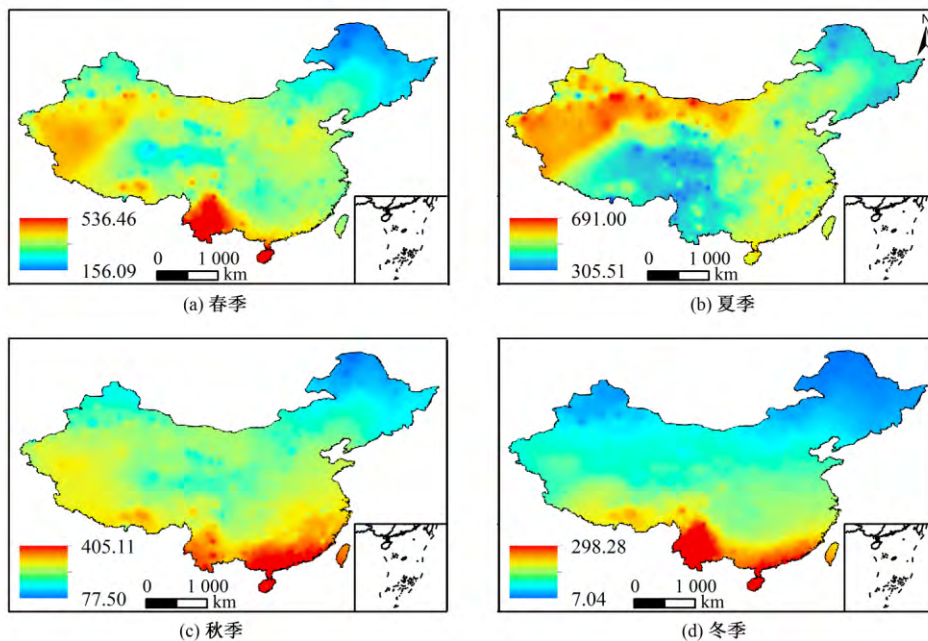


图 6 1961~2017 中国不同季节辐射项蒸发量空间分布(单位: mm/a)

Fig.6 Spatial distribution of radiation evaporation in different seasons of China from 1961 to 2017

2.4.2 动力项

图 7 为中国地区蒸发皿蒸发量动力项的空间分布。春季蒸发量范围为 52.23~512.60 mm/a,在内蒙古和新疆地区蒸发量最大,东北次之,中国南部最小。夏季蒸发量较春季范围增大,范围为 42.82~854.87 mm/a,在新疆东部和内蒙古西部地区蒸发量最大,中国青藏高原、南部及东北地区蒸发量较小。秋季较夏季蒸发量变化范围缩小,其范围为 35.91~392.85 mm/a,

在新疆东部和内蒙古西部地区蒸发量最大。冬季蒸发量变化范围为三个季节最小的,其范围为 5.25~258.40 mm/a,在云南省蒸发量达到最大,青藏高原南部和云南地区较大,在西北地区和东北地区蒸发量最小。动力项的蒸发量整体呈现出夏季>春季>秋季>冬季。动力项的冬季蒸发量最大值在华南地区,其余季节在中国西北地区。

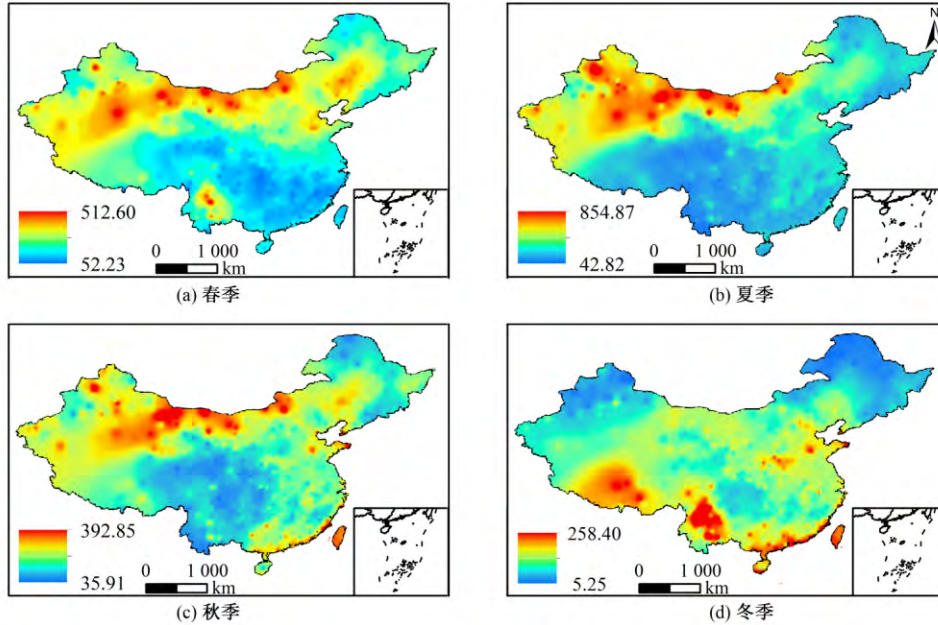


图 7 1961-2017 中国不同季节动力项蒸发量空间分布(单位: mm/a)

Fig.7 Spatial distribution of dynamic component evaporation in different seasons of China from 1961 to 2017

2.4.3 总蒸发皿蒸发量

图 8 为中国地区总蒸发皿蒸发量的空间分布。4 个季节中春季总蒸发量范围为 262.19~1 049.06 mm/a,在新疆南部地区

和内蒙古西部以及云南地区蒸发量最大,东北北部和华中地区较小。夏季相比春季蒸发量增大,其范围为 359.51~1 462.32 mm/a,在新疆地区和内蒙古西部地区蒸发量最大,华北和华中

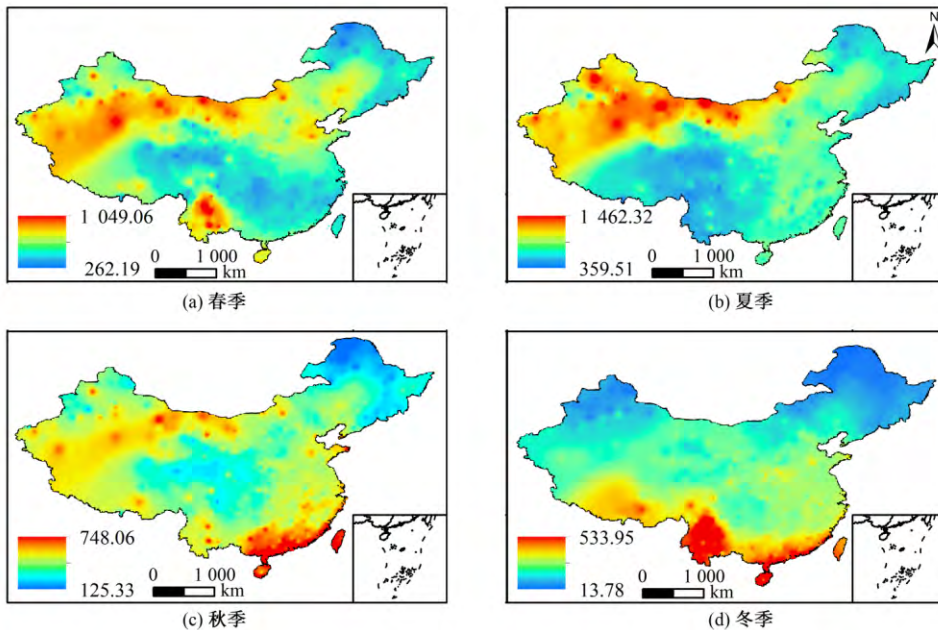


图 8 1961-2017 中国不同季节总蒸发量空间分布(单位: mm/a)

Fig.8 Spatial distribution of total evaporation in different seasons of China from 1961 to 2017

地区次之,东北和青藏高原地区较小。与春夏季节相比,秋季蒸发皿蒸发量减小,其范围为 125.33~748.06 mm/a,中国南部沿海地区蒸发量最大,新疆和青藏高原西南部次之,东北地区最小。冬季蒸发量为 4 个季节中最小的,其变化范围为 13.78~533.95 mm/a,云南和中国南部沿海地区的蒸发量最大,且向北逐渐变小。总蒸发皿蒸发量受辐射项和动力项两者共同作用,总蒸发量范围表现出夏季>春季>秋季>冬季。随着季节变化,辐射项和动力项在空间上差异显著,总蒸发量最大值从北方转移到了南方,说明在不同季节影响蒸发皿蒸发量主导因素不同。

2.5 中国地区蒸发皿蒸发量的成因分析

本研究表明中国地区蒸发皿蒸发量呈现季节性差异,因此对影响蒸发皿蒸发量的气象要素进一步分析。结果表明:1961-2017 年影响蒸发皿蒸发量的主导气象要素为风速,其次是饱和水汽压差,然后是太阳辐射,最后是空气温度(表 2),这也解释了随着空气温度上升,蒸发量呈现下降趋势,不同气象要素对蒸发皿蒸发量的作用相互抵消,空气温度的影响较小。不同季节中,春季表现为饱和水汽压差和风速共同占主导地位,然后是空气温度,最后是太阳辐射。夏季与春季相比,主导气象要素变为太阳辐射,其次是饱和水汽压差,然后是风速,最后是空气温度。秋季和春季主导气象要素都为饱和水汽压差,风速次之,接着太阳辐射,最后是空气温度。冬季和秋季相比,温度和太阳辐射影响的重要性位置互换,饱和水汽压差和风速不变。不同季节具体表现为:秋季和冬季都是饱和水汽压差占主导地位,而春季的饱和水汽压差和风速共同占主导因素,在夏季太阳辐射占主导地位。对不同时段进行成因分析,可知:第一时段 1961-1993 年风速占主导地位,不同季节中,夏季太阳

表 2 中国蒸发皿蒸发量成因分析

Tab.2 Analysis of the attribution of pan evaporation in China

时期	季节	温度 (T_a)	风速 (u_2)	太阳辐射 (R_n)	饱和水汽 压的差 (vpd)	气象因素作用
1961-2017	年	0.15	0.34	0.18	0.33	$u_2 > vpd > R_n > T_a$
	春	0.18	0.33	0.16	0.33	$vpd = u_2 > T_a > R_n$
	夏	0.13	0.25	0.32	0.30	$R_n > vpd > u_2 > T_a$
	秋	0.18	0.27	0.23	0.31	$vpd > u_2 > R_n > T_a$
	冬	0.21	0.27	0.16	0.37	$vpd > u_2 > T_a > R_n$
1961-1993	年	0.10	0.45	0.19	0.26	$u_2 > vpd > R_n > T_a$
	春	0.14	0.38	0.19	0.28	$u_2 > vpd > R_n > T_a$
	夏	0.11	0.29	0.32	0.28	$R_n > u_2 > vpd > T_a$
	秋	0.18	0.30	0.25	0.28	$u_2 > vpd > R_n > T_a$
	冬	0.20	0.29	0.15	0.36	$vpd > u_2 > T_a > R_n$
1994-2017	年	0.18	0.12	0.19	0.51	$vpd > R_n > T_a > u_2$
	春	0.23	0.15	0.24	0.38	$vpd > R_n > T_a > u_2$
	夏	0.16	0.10	0.28	0.47	$vpd > R_n > T_a > u_2$
	秋	0.19	0.15	0.31	0.35	$vpd > R_n > T_a > u_2$
	冬	0.24	0.12	0.20	0.44	$vpd > T_a > R_n > u_2$

辐射占主导因素,冬季饱和水汽压差占主导地位,其余季节风速占主导地位。根据表 1 的趋势分析得出,太阳辐射和风速均处于下降趋势,导致在此期间温度虽然上升,但蒸发皿蒸发量仍处于下降的趋势。与第一时段相比,第二时段(1994-2017 年)主导气象要素由风速变为饱和水汽压差。除了冬季空气温度和太阳辐射互换顺序,春、夏秋和多年排序一致。此时饱和水汽压的影响呈现显著上升的趋势,空气温度的作用增大,风速作用减小。

3 讨论

本研究运用 PenPan 模型对中国地区蒸发皿蒸发量进行估算,发现 1993 年前后中国地区“蒸发悖论”现象消失。随季节变化,中国蒸发皿蒸发量最大值所在区域由西北地区转移到了中国南方地区。春夏两个季节蒸发量最大值所在区域在西北地区,秋季和冬季在华南地区。盛琼^[36]分析了 1957-2001 年中国地区蒸发皿蒸发量得出春夏秋蒸发量最大在中国西北地区,冬季在云南地区,秋季结果与本文研究有所差异,其余季节相同。

进一步分析了影响蒸发皿蒸发量的主导气象因素,发现在 1993 年前后主导气象因素由风速转变为饱和水汽压的差,空气温度的作用增大,风速的作用减小,这是蒸发皿蒸发量趋势发生变化的原因。刘波^[37]分析了中国地区 1960-2000 年的蒸发皿蒸发量,得出中国大部分地区蒸发皿下降的主导因素为风速,这和本文第一时段的研究结果一致。本研究是针对全国区域,有研究发现不同区域的影响因素有所差异,但是风速的主导地位在各地区都有所显现。如淮河流域,影响蒸发皿蒸发量气象因素排序为风速>太阳辐射>空气温度>饱和水汽压差^[26];京津冀地参考作物蒸发量在 1961-1991 年的气象要素排序为风速>相对湿度>空气温度>日照时数,在 1992-2015 年气象要素排序为空气温度>风速>相对湿度>日照时数^[38];青海地区,刘蓓^[39]发现日较差和风速的减小是影响青海省蒸发皿蒸发量的最主要原因。说明研究的区域不同,研究结果虽然有所差异,但风速的下降是蒸发皿蒸发量下降的主要因素。第二时段蒸发量的趋势发生变化,根据研究结果发现(表 1),在 1961-1993 年期间,风速的变化呈现显著下降的趋势,在 1994-2017 年后风速下降趋势不显著,饱和水汽压的差却呈现显著增加的趋势,这可能是主导因素由风速转变为饱和水汽压的差的原因。此外,空气温度对蒸发皿蒸发量的影响变大。

本文利用 PenPan 模型对中国地区蒸发皿蒸发量进行分析,得出了中国地区蒸发皿蒸发量在时间和空间上的变化及主导因素的转变情况。但是由于研究区域较大,不同地区的地理环境和局部气候因素不同,其主导因素可能改变,说明应该分区进行研究或者针对特定的区域进行分析,特别是西北和华南地区,以探究具体地区蒸发皿蒸发量的影响因素,为中国地区水资源的合理调配进一步提出指导方案。

4 结论

本文选用 PenPan 模型对中国地区蒸发皿蒸发量进行趋势研究和成因分析,得到以下主要结论:

(1) 中国地区蒸发皿蒸发量在 1961–1993 年呈现下降趋势; 在 1994–2017 年呈现上升趋势, 1993 年是中国地区“蒸发悖论”现象消失年份。

(2) 春夏秋冬 4 个季节, 蒸发量空间差异变化大。辐射项蒸发量夏季最大值出现在西北地区, 其余季节在华南地区; 动力项蒸发量冬季最大值出现在华南地区, 其余季节在西北地区; 随着季节推移, 总蒸发量最大区域由西北转移到华南地区。

(3) 1961–2017 年风速是影响中国地区蒸发皿蒸发量的主导气象因素, 在 1961–1993 年间风速占主导地位, 而 1994–2017 年间饱和水汽压差占主导地位, 在季节上和年的气象因素排序基本一致。影响中国地区蒸发量的主导因素在 1993 年前后发生变化, 空气温度的影响增大, 风速的影响减小, 气象要素的趋势变化和主导气象因素改变是中国地区蒸发皿蒸发量趋势发生变化的原因。

参考文献:

- [1] LIU X, LUO Y, ZHANG D, et al. Recent changes in pan-evaporation dynamics in China[J]. *Geophysical Research Letters*, 2011, 38: 1–4.
- [2] 曾 燕, 邱新法, 刘昌明, 等. 1960–2000 年中国蒸发皿蒸发量的气候变化特征[J]. *水科学进展*, 2007, 18(3): 311–318.
- [3] LIU W, SUN F. Assessing estimates of evaporative demand in climate models using observed pan evaporation over China[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2016, 121(14): 8 329–8 349.
- [4] Statement on the State of the Global Climate in 2017[Z]. WMO, 2018.
- [5] 胡 琦, 董 蓓, 潘学标, 等. 1961–2014 年中国干湿气候时空变化特征及成因分析[J]. *农业工程学报*, 2017, 33(6): 124–132.
- [6] FAN Z-X, THOMAS A. Decadal changes of reference crop evapotranspiration attribution: Spatial and temporal variability over China 1960–2011[J]. *Journal of Hydrology*, 2018, 560: 461–470.
- [7] Azorin-Molina C, VICENTE-Serrano S M, Sanchez-Lorenzo A, et al. Atmospheric evaporative demand observations, estimates and driving factors in Spain (1961–2011) [J]. *Journal of Hydrology*, 2015, 523: 262–277.
- [8] Tabari H, MAROFI S. Changes of pan evaporation in the west of Iran [J]. *Water Resources Management*, 2011, 25(1): 97–111.
- [9] Benña-Naranjo J A, Laverde-Barajas M Á, Pedrozo-Acuña A. Changes in pan evaporation in Mexico from 1961 to 2010[J]. *International Journal of Climatology*, 2017, 37(1): 204–213.
- [10] Chattopadhyay N, Hulme M. Evaporation and potential evapotranspiration in India under conditions of recent and future climate change [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 1997, 87(1): 55–73.
- [11] Peterson T C, Golubey V S, Groisman P Y. Evaporation losing its strength[J]. *Nature*, 1995, 377(6551): 687–688.
- [12] 鲍振鑫, 严小林, 王国庆, 等. 气象因子在海河流域蒸发悖论中的作用机理[J]. *水资源与水工程学报*, 2014, 25(3): 1–7.
- [13] 马雪宁, 张明军, 王圣杰, 等. “蒸发悖论”在黄河流域的探讨[J]. *地理学报*, 2012, 67(5): 645–656.
- [14] 王忠富, 杨礼箫, 白 晓, 等. “蒸发悖论”在黑河流域的探讨[J]. *冰川冻土*, 2015, 37(5): 1 323–1 332.
- [15] Roderick M L, Farquhar G D. The cause of decreased Pan evaporation over the past 50 years[J]. *Science*, 2002, 298(5 597): 1 410–1 411.
- [16] Rayner D P. Wind Run Changes: The dominant factor affecting Pan evaporation trends in Australia [J]. *Journal of Climate*, 2007, 20(14): 3 379–3 394.
- [17] Bandyopadhyay A, Bhadra A, Raghuvanshi N S, et al. Temporal trends in estimates of reference evapotranspiration over India [J]. *Journal of Hydrologic Engineering*, 2009, 14(5): 508–515.
- [18] 刘昌明, 张 丹. 中国地表潜在蒸散发敏感性的时空变化特征分析[J]. *地理学报*, 2011, 66(5): 579–588.
- [19] 祁添森, 张 强, 王 月, 等. 1960–2005 年中国蒸发皿蒸发量变化趋势及其影响因素分析[J]. *地理科学*, 2015, 35(12): 1 599–1 606.
- [20] 刘 敏, 沈彦俊, 曾 燕, 等. 近 50 年中国蒸发皿蒸发量变化趋势及原因[J]. *地理学报*, 2009, 64(3): 259–269.
- [21] 任芝花, 黎明琴, 张纬敏. 小型蒸发器对 E-601B 蒸发器的折算系数[J]. *应用气象学报*, 2002, 13(4): 508–512.
- [22] 段春锋, 缪启龙, 曹 雯, 等. 西北地区小型蒸发皿资料估算参考作物蒸散[J]. *农业工程学报*, 2012, 28(4): 94–99.
- [23] YANG H, YANG D. Climatic factors influencing changing pan evaporation across China from 1961 to 2001 [J]. *Journal of Hydrology*, 2012, 414–415: 184–193.
- [24] XIE H, ZHU X, YUAN D Y. Pan evaporation modelling and changing attribution analysis on the Tibetan Plateau (1970–2012) [J]. *Hydrological processes*, 2015, 29: 2 164–2 177.
- [25] WANG J, WANG Q, ZHAO Y, et al. Temporal and spatial characteristics of pan evaporation trends and their attribution to meteorological drivers in the Three-River Source Region, China [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2015, 120(13): 6 391–6 408.
- [26] LI M, CHU R, SHEN S, et al. Dynamic analysis of pan evaporation variations in the Huai River Basin, a climate transition zone in eastern China [J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 625: 496–509.
- [27] LI Z, CHEN Y, SHEN Y, et al. Analysis of changing pan evaporation in the arid region of Northwest China [J]. *Water Resources Research*, 2013, 49: 2 205–2 212.
- [28] Thom A S, Thony J L, VAUCLIN M. On the proper employment of evaporation pans and atmometers in estimating potential transpiration [J]. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 1981, 107(453): 711–736.
- [29] Rotstayn L D, Roderick M L, Farquhar G D. A simple pan-evaporation model for analysis of climate simulations: Evaluation over Australia [J]. *Geophysical Research Letters*, 2006, 33: 1–5.
- [30] Thom A S, Thony J L, Vauclin M. On the proper employment of evaporation pans and atmometers in estimating potential transpiration [J]. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 1981, 107: 711–736.
- [31] Nash J E, Sutcliffe J V. River flow forecasting through conceptual models part I – A discussion of principles [J]. *Journal of Hydrology*, 1970, 10(3): 282–290.
- [32] JI J, CAI H, HE J, et al. Performance evaluation of CERES-Wheat model in guanzhong plain of Northwest China [J]. *Agricultural Water Management*, 2014, 144: 1–10.

- hydro-political futures would be impossible [C] // In *Priorities for Water Resources Allocation and Management*. London: Overseas Development Administration, 1993: 13-26.
- [3] 程国栋. 虚拟水-中国水资源安全战略的新思路[J]. 中国科学院院刊, 2003(4): 260-265.
- [4] 马玉波. 中国对俄初级农产品贸易中的虚拟水核算[J]. 干旱区资源与环境, 2016, 30(4): 36-39.
- [5] 朱启荣. 中国外贸中虚拟水与外贸结构调整研究[J]. 中国工业经济, 2014(2): 58-70.
- [6] 李凤丽, 曲士松, 王维平, 等. 1997-2012年山东省虚拟水贸易变化及典型区生态环境响应[J]. 灌溉排水学报, 2018, 37(2): 123-129.
- [7] 张杰, 邓晓军, 邹婷婷, 等. 基于虚拟水的广西农业产业结构调整优化[J]. 节水灌溉, 2017(7): 61-65.
- [8] 龙爱华, 徐中民, 张志强, 等. 甘肃省2000年水资源足迹的初步估算[J]. 资源科学, 2005(3): 123-129.
- [9] 吕娜娜, 白洁, 常存, 等. 近50年基于农作物种植结构的新疆绿洲农田蒸散发时空变化分析[J]. 地理研究, 2017, 36(8): 1443-1454.
- [10] 马林潇, 何英, 林丽, 等. “三条红线”约束下的种植结构多目标优化模型研究[J]. 灌溉排水学报, 2018, 37(9): 123-128.
- [11] 朱启荣, 孙雪洁, 杨媛媛. 虚拟水视角下中国农产品进出口贸易节水问题研究[J]. 世界经济研究, 2016(1): 87-98, 137.
- [12] 宛敏渭. 中国自然历选编[M]. 北京: 科学出版社, 1986.
- [13] 中国主要农作物蓄水量等值线图协作组. 中国主要农作物需水量等值线图研究[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 1990-2009.
- [14] 何艳秋, 戴小文. 中国农业碳排放驱动因素的时空特征研究[J]. 资源科学, 2016, 38(9): 1780-1790.
- [15] 刘照德, 林海明. 对应分析法的改进与应用[J]. 数理统计与管理, 2018, 37(2): 243-254.
- [16] 张润, 刘志辉, 秦艳, 等. 新疆2000-2012年主要农作物虚拟水含量计算与分析[J]. 水土保持研究, 2015, 22(4): 265-268.

(上接第94页)

- [33] Mann H B. Nonparametric tests against trend [J]. *Econometrica: Journal of the Econometric Society*, 1945, 13(3): 245-259.
- [34] Kendall M G. Rank correlation methods [M]. Boston: Springer, MA, 1955.
- [35] Zongxing L, Qi F, Wei L, et al. Spatial and temporal trend of potential evapotranspiration and related driving forces in Southwestern China, during 1961 - 2009 [J]. *Quaternary International*, 2014, 336: 127-144.
- [36] 盛琼. 近45 a来我国蒸发皿蒸发量的变化及原因分析[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2006.
- [37] 刘波. 近四十年中国蒸发皿蒸发变化与气候变化的关系及潜在蒸散的估算[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2005.
- [38] HAN J, WANG J, ZHAO Y, et al. Spatio-temporal variation of potential evapotranspiration and climatic drivers in the Jing-Jin-Ji region, North China [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2018, 256-257: 75-83.
- [39] 刘蓓. 青海蒸发皿蒸发量时空变化特征及成因分析[J]. 青海环境, 2015, 25(1): 14-20.

《节水灌溉》投稿须知

(1) 文稿务求论点明确, 论据可靠, 数字准确(统一有效位数), 文字精练, 勿使用方言, 应注意保守国家机密, 引用资料请列出出处, 不得侵犯他人著作权。文章应有300字以内的中、英文摘要, 并选取3~8个中、英文关键词。

(2) 文稿直接通过网上投稿。文稿字数一般不超过6000字(包括图、表)。文中计量单位一律采用法定计量单位。

(3) 文稿中的表格采用三线表形式, 除应注明表序、表名外, 表内所用外文符号及其单位应与文稿中相应的外文符号及其单位一致。文稿中的插图请注明图序和图名, 插图中的外文符号及其单位应与文稿中相应的外文符号及其单位一致。机械图、电路图等的描绘应依照有关国家标准。除机械图外, 其他插图中所标尺寸均应注明单位。文稿中的物理量符号(包括角标)须给出相应的意义解释(必要时在文稿后附上本文符号意义表)。图名与表名应中英文对照。

(4) 文末应附参考文献。参考文献只需择其主要者列出, 作者撰文时参考过的本刊文献, 应尽量列入, 未公开发表的资料请勿引用。文献序号按文中出现的先后顺序排列, 著录项目和著录格式参见《文后参考文献著录规则》(GB/T7714-2005)。

(5) 来稿如属国家及部委、省级自然科学基金, 国家及部委、省级重大(重点)或攻关项目的部分内容和研究成果, 请在文末说明, 本刊将优先刊出。如曾在全国性学术会议上宣读, 也请在文末予以说明。

(6) 所有来稿均需附有作者简介。作者简介务请写清姓名、性别、年龄、职称、职务、研究方向以及E-mail。

(7) 请勿一稿多投, 并请自留底稿, 一般不退稿。稿件投出后3个月未接到本刊采用通知者, 可自行处理。来稿一经刊登, 即按本刊规定付酬, 并赠当期杂志两册。

(8) 本刊已与有关机构合作出版网络版和光盘版, 作者稿件一经录用, 将同时被网络版和光盘版收录, 如作者不同意收录, 请将稿件另投他刊。

(9) 投稿请登录我刊官方网站: <http://www.irrigate.com.cn> 投稿(先进“节水灌溉”, 再进“作者中心”投稿), 联系电话:(027) 68776133。

《节水灌溉》编辑部