

DOI: 10.13930/j.cnki.cjea.190340

龙学智, 刘苏峡, 莫兴国, 陈学娟. 基于 Copula 的京津冀平原作物水分利用效率驱动因子分析[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2019, 27(12): 1833–1845

LONG X Z, LIU S X, MO X G, CHEN X J. Analysis of water use efficiency and driving factors in the Beijing-Tianjin-Hebei Province Plain using the Copula method[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2019, 27(12): 1833–1845

# 基于 Copula 的京津冀平原作物水分利用效率 驱动因子分析\*

龙学智<sup>1,2</sup>, 刘苏峡<sup>1,2\*\*</sup>, 莫兴国<sup>1,2</sup>, 陈学娟<sup>1,2</sup>

(1. 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; 2. 中国科学院大学资源与环境学院/中丹学院 北京 100049)

**摘要:** 农业是京津冀地区最主要的用水部门, 提高农业用水效率有助于缓解京津冀水资源压力, 实现可持续发展。基于 VIP 模型模拟的 1980—2013 年京津冀平原作物水分利用效率(WUE)、作物净初级生产力(NPP)、作物实际蒸散发(ETa), 结合同期年平均气温(Tmean)、年降水量(Pre)和年日照时数(Sun), 应用 Copula 函数理论分别建立 WUE 与 NPP、ETa、Tmean、Pre、Sun 的 5 组联合概率分布函数, 计算各驱动因子在低、中、高取值条件下 WUE 大于任一特定取值的可能性(定义为 WUE 条件概率), 探索 WUE 的驱动关系。结果表明: 1) 驱动因子 NPP、ETa、Sun 取值越大, WUE 大于任一特定取值的可能性越大; 而驱动因子 Tmean 和 Pre 取值越小, WUE 大于任一特定取值的可能性越大。2) 若以各驱动因子分别在高、低取值条件下的 WUE 条件概率的差值来反映 WUE 对各驱动因子大小的敏感程度, WUE 对 NPP 的大小最为敏感, 而后依次是 Sun、ETa、Pre、Tmean。3) 对比不同驱动因子相同取值条件下的 WUE 条件概率, 较低的 NPP 会明显抑制 WUE 的大小, 提高 NPP 对 WUE 的提升有明显的保障作用。综上所述, 作物 WUE 同时受光合作用和蒸腾作用两个生理过程控制, 较难确定光合和蒸腾对 WUE 的驱动关系; WUE 与驱动因子的联合概率分布和条件概率分析指出, 在京津冀平原可以采用在控制耗水的条件下提高 NPP 的策略, 该策略可能比在控制产量的条件下减少耗水的策略更有效。

**关键词:** 京津冀平原; 作物水分利用效率; 驱动因子; Copula 函数; VIP 模型; 作物净初级生产力(NPP)

中图分类号: K903

文章编号: 2096-6237(2019)12-1833-13

开放科学码(资源服务)标识码(OSID):



## Analysis of water use efficiency and driving factors in the Beijing-Tianjin-Hebei Province Plain using the Copula method\*

LONG Xuezhi<sup>1,2</sup>, LIU Suxia<sup>1,2\*\*</sup>, MO Xingguo<sup>1,2</sup>, CHEN Xuejuan<sup>1,2</sup>

(1. Key Laboratory of Water Cycle and Related Land Surface Processes, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China; 2. School of Natural Resources and Environment / Sino-Danish College, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

\* 国家重点研发计划课题(2016YPC0401402)和国家自然科学基金项目(41471026)资助

\*\* 通信作者: 刘苏峡, 主要从事水文水资源研究。E-mail: liusx@igsrr.ac.cn

龙学智, 主要从事水文水资源研究。E-mail: longxz.15s@igsrr.ac.cn

收稿日期: 2019-05-06 接受日期: 2019-08-26

\* This study was supported by the National Key Research and Development Plan of China (2016YPC0401402) and the National Natural Science Foundation of China (41471026).

\*\* Corresponding author, E-mail: liusx@igsrr.ac.cn

Received May 6, 2019; accepted Aug. 26, 2019

**Abstract:** Agricultural irrigation accounts for >65% of water use in the Beijing-Tianjin-Hebei Province Plain. Improving the agricultural water use efficiency will help relieve the pressure on the water resources found in the Beijing-Tianjin-Hebei Plain and promote sustainable development. Based on water use efficiency (WUE), net primary productivity (NPP), and actual evapotranspiration (ETa) from 1980 to 2013 simulated by the VIP model, combined with the annual mean air temperature (Tmean), annual precipitation (Pre), and annual sunshine duration (Sun), the Copula method was used to create five groups of joint probability distributions: WUE and NPP, ETa, Tmean, Pre, and Sun. Conditional probability was calculated based on the hypothesis that WUE was greater than any particular value under low, medium, and high value ranges of each driving factor. The findings showed that the greater the values of NPP, ETa, and Sun, the more likely was WUE to be greater than any particular value. However, the lower the values of Tmean and Pre, the more likely was WUE to be greater than any particular value. The sensitivity of WUE to variation in the value of each driving factor was reflected by the difference of the conditional probability of WUE under high and low value ranges, suggesting that WUE was most sensitive to the variation in the value of NPP followed by those of Sun, ETa, Pre, and Tmean. Comparison of the conditional probabilities of WUE under the same value conditions of NPP, ETa, Tmean, Pre, and Sun showed that a lower NPP clearly suppressed WUE and that improvement in NPP guaranteed a higher value of WUE. Crop WUE is controlled simultaneously by photosynthesis and transpiration, which makes it difficult to ascertain the driving mechanism underlying WUE. Based on the joint probability distribution determined using the Copula method and conditional probability analysis, we concluded that improving NPP when water consumption is controlled may be a more effective strategy than reducing water consumption when grain yield is controlled to adopt in the Beijing-Tianjin-Hebei Province Plain.

**Keywords:** Beijing-Tianjin-Hebei Province Plain; Water use efficiency; Driving factors; Copula; VIP model; Net primary productivity (NPP)

京津冀以北京为核心,天津和河北为两翼,是我国政治、经济、文化和科技中心。《京津冀协同发展规划纲要》将其定位为“以首都为核心的世界级城市群、区域整体协同发展改革引领区、全国创新驱动经济增长新引擎、生态修复环境改善示范区”。1956—2014年京津冀地区多年平均水资源量约为240亿 $m^3$ ,水资源公报统计的2001—2016年平均水资源量约为183亿 $m^3$ ,较多年平均值减少约24%,且人均水资源量不到全国平均水平的1/10,水资源极其紧缺<sup>[1-2]</sup>。京津冀地区长期过度开发利用水资源来支撑经济社会的发展,引起了一系列的水环境问题,如河道断流、水体污染严重、地下水漏斗等,水资源已经成为限制地区发展的关键要素<sup>[1]</sup>。

水资源公报数据显示,2001—2016年京津冀地区多年平均农业用水量约为171亿 $m^3$ ,约占地区总用水量的67%左右,是京津冀地区最主要的用水部门,也被广泛认为是地下水过度开采的主要原因<sup>[3]</sup>。京津冀地区广泛采用冬小麦(*Triticum aestivum*)和夏玉米(*Zea mays*)一年两熟轮作的耕种模式,其中冬小麦生育期降水量远低于作物需水量,地下水灌溉成了农业生产的重要保障<sup>[4]</sup>。因此,提高农业用水效率是缓解京津冀地区水资源压力的有效途径,也是实现可持续发展的关键。

农业种植的用水过程可以概括为3个主要环节,即从水源输水到农田的过程、田间灌溉过程、作物吸收及生长过程,因此便产生了对上述3个过程

的农业用水效率评价方法,分别为输配水效率、田间灌水效率、作物水分利用效率<sup>[5-6]</sup>。灌溉水有效利用系数常被用作灌溉用水效率的表征指标,通常表示为灌入田间可被作物利用的水量与灌溉用水总量之比,也可以表示为输配水效率与田间灌水效率的乘积,是一个无量纲数。作物水分利用效率则反映的是作物吸收水分并进行光合作用生成产物的过程对应的用水效率,表示为作物产量与蒸散发量的比值。冯保清<sup>[6]</sup>详细梳理了不同尺度灌溉用水效率评价的理论和方法,确定了灌区、省级区域、全国这3个尺度的灌溉水有效利用系数的评价方法,并研究了相应的影响因素。随着遥感技术的发展,基于遥感信息的作物水分利用效率得到了广泛的研究,尚松浩等<sup>[5]</sup>总结了遥感技术在蒸散发模型和作物估产模型等方面应用的研究进展,并评述了其在作物水分利用效率评价中的应用情况。目前,遥感信息与模型结合的作物水分利用效率研究已经在多个区域和不同尺度得到广泛开展<sup>[7-10]</sup>。此外,以经济学为基础的全要素农业用水效率的理论和应用也在近年得到迅速发展,在多个区域和不同尺度范围均有应用<sup>[11-12]</sup>。

采用多种统计方法分析水文时间序列已有长足进展<sup>[13]</sup>。Copula函数理论被引入水文水资源研究后,其在多变量水文分析中得到了广泛的应用<sup>[14]</sup>。熊立华等<sup>[15]</sup>较早地在国内水文研究中介绍了Copula函数的定义、属性和构造方法,并尝试建立了河流上下游两个

站点的最大洪水联合分布函数。Salvadori等<sup>[16]</sup>系统性介绍了Copula函数在水文极值及其重现期研究中的应用。Hao等<sup>[17]</sup>应用Copula函数及条件概率分析对中国东部地区由极端高温引起的干旱进行了风险评估; Madadgar等<sup>[18]</sup>应用Copula函数和条件概率分析研究了降水量和土壤湿度与农作物产量的关系, 用于估计干旱对作物产量的影响。

目前, Copula函数理论在农业用水效率研究中的应用较少, 特别是在作物水分利用效率的研究中尚少见报道。李浩鑫等<sup>[19]</sup>基于传统的灌溉用水效率评价指标体系, 建立了PCA-Copula灌溉用水评价方法, 并在7个灌区进行了实证分析。Zhao等<sup>[20]</sup>应用Copula函数建立了灌溉用水量与灌溉用水效率的联合分布, 并分析了不同水平年的河流流量与灌溉用水效率的关系。

本文以京津冀平原为研究区, 应用Copula函数理论分别建立作物水分利用效率(water use efficiency, WUE)与作物净初级生产力(net primary productivity, NPP)、作物实际蒸散发(actual evapotranspiration, ETa)、年平均气温(annual mean temperature, Tmean)、年降水量(annual precipitation, Pre)、年日照时数(sunshine duration, Sun)等5个随机变量的5组联合分布, 采用条件概率分析研究WUE与NPP、ETa、Tmean、Pre、Sun 5个驱动因子的关系, 建立WUE相对于上述各因子的Copula谱系, 探索提高WUE的潜在途径以缓解地区水资源压力。

## 1 研究区概况及数据资料

### 1.1 研究区概况

京津冀平原是北京市、天津市和河北省的全部平原区, 是华北平原的一部分, 西起太行山脉, 北靠燕山山脉, 东临渤海, 总面积约 $9.5 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。京津冀平原为温带大陆性季风气候, 降水在年内分布不均, 主要集中在6—9月。京津冀平原绝大部分属于海河流域, 为我国严重缺水地区, 地下水超采严重。研究区内主要采用冬小麦和夏玉米一年两熟轮作的耕种模式, 小麦和玉米的播种面积占粮食作物总播种面积的80%左右, 灌溉用水主要依赖地下水。

### 1.2 数据资料

本文采用的WUE被定义为NPP和ETa的比值, NPP和ETa数据来源于VIP分布式生态水文模型(vegetation interface process model, 简称VIP模型)对研究区1980—2013年的模拟结果<sup>[21]</sup>。VIP模型以降水、气温、日照时数、相对湿度和大气压等气象要素作为驱动, 基于DEM数据、土壤类型、土地利用

类型和植被类型等地理信息, 模型具体设置和模拟验证参见文献[21]。

分析所用的平均气温(Tmean)、降水(Pre)和日照时数(Sun)等气象数据来自中国气象科学数据共享服务网, 采用ANUSPLIN插值软件, 基于研究区的DEM数据, 经空间插值获得。

利用研究区土地利用类型资料提取出1980—2013年京津冀平原耕地, 再根据VIP的输出结果和气象要素输入数据, 获得WUE、NPP、ETa、Tmean、Sun和Pre 6个变量在1980—2013年空间平均值的时间序列数据。

## 2 研究方法

### 2.1 单变量概率分布函数估计

随机变量概率分布函数估计是水文频率分析的核心内容, 主要包括分布函数的选择和参数的估计两个关键问题, 从而实现对水文变量总体概率分布的描述。分布函数的选择即线型的选择, 目前国内常用的线型有十几种, 本文以正态分布、Gamma分布、GEV分布、极值分布(extreme value distribution, EV)和Logistic分布作为备选分布函数。分布函数的参数估计方法主要有矩法、权函数法、适线法和最大似然估计法等方法, 本文采用最大似然估计法进行随机变量分布函数的参数估计。

Kolmogorov-Smirnov (K-S)检验用于检验单一样本是否服从某一特定理论分布, 或比较两个经验分布是否有显著差异。设样本的经验分布为 $F_n(x)$ , 检验样本观测是否来自一个已知理论分布 $F_0(x)$ , 则有零假设 $H_0: F_n(x) = F_0(x)$ , 备选假设 $H_1: F_n(x) \neq F_0(x)$ , 构造K-S统计量:

$$D_n = \max_{1 \leq i \leq n} |F_n(x_i) - F_0(x_i)| \quad (1)$$

在显著性水平为 $\alpha$ 的条件下, 若 $D_n \geq D_{n, \alpha}$ , 则拒绝零假设 $H_0$ , 认为样本不服从理论分布 $F_0(x)$ ; 若 $D_n < D_{n, \alpha}$ , 则接受零假设 $H_0$ , 认为样本服从理论分布 $F_0(x)$ 。

采用Gringorten公式来计算经验频率, 其表达式为:

$$P_m = \frac{m - 0.44}{N + 0.12} \quad (2)$$

式中:  $P_m$ 表示观测值大于或等于 $x_m$ 的经验频率,  $m$ 表示样本自大到小排列的项数,  $N$ 为样本容量。

应用最大似然估计法分别对备选分布函数进行参数估计, 由K-S检验样本是否服从相应理论分布, 再通过比较均方根误差RMSE优选最合适的分

布函数。

### 2.2 二维 Copula 联合分布函数

Sklar 定理是 Copula 函数的理论基础，通过 Copula 函数可以将多个随机变量的边缘分布连接构造一个多元联合分布，实现多变量整体相关结构的刻画。设  $N$  维随机变量  $X_1, X_2, \dots, X_N$  的边缘分布函数分别为  $F_{X_i}(x) = P_{X_i}(X_i \leq x_i)$ ，其中  $x_i$  为随机变量  $X_1, X_2, \dots, X_N$  的取值，随机变量  $X_1, X_2, \dots, X_N$  的联合分布函数记为：

$$H(x_1, x_2, \dots, x_N) = P(X_1 \leq x_1, X_2 \leq x_2, \dots, X_N \leq x_N) \quad (3)$$

以二维随机变量  $X$  和  $Y$  为例， $F(x)$  和  $G(y)$  分别为  $X$  和  $Y$  的边缘分布，分别记为  $u$  和  $v$ 。根据 Sklar 定

理，存在唯一的 Copular 函数  $C$ ，使任一  $x, y \in R$  有：

$$P(X \leq x, Y \leq y) = H(x, y) = C[F(x), G(y)] = C(u, v) \quad (4)$$

如果  $F$  和  $G$  连续，则  $C$  是唯一的。如果  $C$  是一个 Copula 函数，且  $F$  和  $G$  分别为边缘分布，则  $H$  是  $F$  和  $G$  的一个联合分布函数。

#### 2.2.1 Copula 函数形式

水文领域常用的 Copula 函数总体上可划分为 Archimedean Copula、椭圆 Copula 和二次型 Copula 3 类，其中 Archimedean Copula 函数应用最为广泛。此外，Copula 函数还可以根据 Copula 参数  $\theta$  的个数和取值范围来分类。本文为保证 Copula 函数的适用性，以 Copula 参数  $\theta$  的取值范围涵盖正负区间为选择依据，采用表 1 所列的 5 种 Copula 函数。

表 1 Copula 函数形式及参数取值范围  
Table 1 The Copula functions and the range of parameters

函数名称 Function	数学表达式 Formular	参数取值范围 Range of parameter
Gaussian	$\int_{-\infty}^{\phi^{-1}(u)\phi^{-1}(v)} \frac{1}{2\pi\sqrt{1-\theta^2}} \exp\left[\frac{2\theta xy - x^2 - y^2}{2(1-\theta^2)}\right] dx dy$	$\theta \in [-1, 1]$
Frank	$-\frac{1}{\theta} \ln \left\{ 1 + \frac{[\exp(-\theta u) - 1][\exp(-\theta v) - 1]}{\exp(-\theta) - 1} \right\}$	$\theta \in R \setminus 0$
Ali-Mikhail-Haq (AMH)	$\frac{uv}{1 - \theta(1-u)(1-v)}$	$\theta \in [-1, 1]$
Farlie-Gumbel-Morgenstern (FGM)	$uv[1 + \theta(1-u)(1-v)]$	$\theta \in [-1, 1]$
Cubic	$uv[1 + \theta(u-1)(v-1)(2u-1)(2v-1)]$	$\theta \in [-1, 2]$

$u$  和  $v$  分别为随机变量  $X$  和  $Y$  边缘分布函数，分别表示随机变量  $X \leq x$  的概率和随机变量  $Y \leq y$  的概率。 $\theta$  为 Copula 函数的参数。 $u$  和  $v$  是 the probability distribution function of random variable  $X$  and  $Y$ , respectively, which is the probability when  $X$  is not large than observed  $x$  and  $Y$  is not large than observed  $y$  respectively.  $\theta$  is the parameter of Copula function.

#### 2.2.2 Copula 函数的参数估计

目前常用的 Copula 函数参数估计方法主要有 Kendall 相关系数法、最大似然估计法、适线法等。Sadegh 等<sup>[22]</sup>提出了基于马尔科夫链蒙特卡罗模拟 (Markov chain Monte Carlo, MCMC) 的 Copula 函数参数估计算法，并开发了多变量 Copula 分析工具箱 (Multivariate Copula Analysis Toolbox, MvCAT)。本文应用 MvCAT 工具进行 Copula 函数的参数估计。

#### 2.2.3 Copula 函数的拟合检验

Zhang 等<sup>[23]</sup>引入 AIC 指标 (Akaike's information criterion, AIC) 用于 Copula 函数的优选，其表达式为：

$$AIC = -2 \ln(l_{\max}) + 2D \quad (5)$$

式中： $l_{\max}$  为极大似然函数值， $D$  为 Copula 函数参数个数。AIC 值越小，表明拟合结果越好。

此外，RMSE 也被用于反映 Copula 函数的拟合情况，表达式如下：

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n [\tilde{y}_i - y_i(\theta)]^2}{n}} \quad (6)$$

式中： $\tilde{y}$  为实测概率值， $y_i$  为 Copula 函数计算的概率值。RMSE 越接近于 0，则拟合结果越好。

### 2.3 基于二维 Copula 函数的条件概率

在建立边缘分布函数和 Copula 联合分布函数的基础上，可以进一步推求变量的条件概率分布。在  $X \leq x$  条件下，随机变量  $Y$  大于某一可能取值的累计概率可以表示为：

$$P(Y > y | X \leq x) = \frac{u - c(u, v)}{u} \quad (7)$$

在  $X > x$  条件下，随机变量  $Y$  大于某一可能取值的累计概率可以表示为：

$$P(Y > y | X > x) = \frac{1 - u - v + c(u, v)}{1 - u} \quad (8)$$

在  $x_1 < X \leq x_2$  条件下，随机变量  $Y$  大于某一可能取值的累计概率可以表示为：

$$P(Y > y | x_1 < X \leq x_2) = \frac{u_2 - u_1 - [c(u_2, v) - c(u_1, v)]}{u_2 - u_1} \quad (9)$$

### 3 结果与分析

#### 3.1 WUE 及相关变量的边缘分布拟合

对WUE、NPP、ETa、Tmean、Sun和Pre 6个变量34年时间序列数据，分别以正态分布、Gamma分布、GEV分布、EV分布和Logistic分布对6个随机变量进行边缘分布拟合，K-S检验结果如表2所示。对于每一个随机变量而言，5种备选边缘分布函数拟合结果的  $D_n$  均小于  $D_{34,0.01}$ ，在0.01显著性水平下通过K-

S检验，表明5种备选分布函数均能用于拟合WUE等6个随机变量的分布。以RMSE作为评价边缘分布拟合情况的依据，RMSE越小则拟合结果越好，不难发现WUE、NPP和ETa 3个VIP模型模拟的变量分别用EV分布、正态分布和Logistic分布能够较好地拟合其边缘分布，而Tmean、Sun和Pre 3个气象要素则均能通过GEV分布实现较好的边缘分布拟合。最大似然估计法给出了6个变量所对应的边缘分布函数的参数估计值，相应的边缘分布函数及参数如表3所示。

表 2 1980—2013 年研究区作物水分利用效率及相关变量的边缘分布假设检验结果

Table 2 The hypothesis tests of marginal distributions of water use efficiency, net primary productivity, actual evapotranspiration, annual mean air temperature, sunshine duration, and annual precipitation of the Beijing-Tianjin-Hebei Plain from 1980 to 2013

变量名称 Variable	正态分布 Normal distribution		Gamma 分布 Gamma distribution		GEV 分布 GEV distribution		EV 分布 EV distribution		Logistic 分布 Logistic distribution	
	$D_n$	RMSE	$D_n$	RMSE	$D_n$	RMSE	$D_n$	RMSE	$D_n$	RMSE
作物水分利用效率 Water use efficiency	0.105***	0.052	0.111***	0.055	0.073***	0.033	0.058***	<b>0.027</b>	0.086***	0.046
作物净初级生产力 Net primary productivity	0.058***	<b>0.031</b>	0.065***	0.032	0.086***	0.036	0.105***	0.045	0.062***	0.031
作物实际蒸散发 Actual evapotranspiration	0.110***	0.044	0.110***	0.044	0.087***	0.047	0.094***	0.050	0.107***	<b>0.043</b>
年平均气温 Annual mean air temperature	0.056***	0.028	0.056***	0.029	0.079***	<b>0.025</b>	0.095***	0.034	0.081***	0.028
年日照时数 Sunshine duration	0.073***	0.030	0.078***	0.030	0.064***	<b>0.030</b>	0.112***	0.046	0.083***	0.033
年降水量 Annual precipitation	0.051***	0.024	0.060***	0.030	0.042***	<b>0.021</b>	0.082***	0.033	0.057***	0.031

$D_{34,0.01} = 0.2728$ ;  $D_{34,0.05} = 0.2275$ ;  $D_{34,0.01} = 0.2048$ 。\*\*\*分别表示在 1%显著性水平下通过 K-S 检验。针对每个变量，5 个备选边缘分布函数的拟合结果中 RMSE 最小的用加粗表示，表明拟合结果最优，相应的边缘分布函数用于描述变量的概率分布情况。“\*\*\*” means passing K-S test at significance level of 1%. The smallest RMSE among 5 candidate marginal distribution functions is bolded, standing for the best fitting of the probability distribution of every random variable.

表 3 1980—2013 年研究区作物水分利用效率及相关变量的边缘分布函数

Table 3 The marginal distribution functions of water use efficiency and other relevant variables of the Beijing-Tianjin-Hebei Plain

变量名称 Variable	概率密度函数 Probability density function	参数估计值 Parameter
作物水分利用效率 Water use efficiency	$f(x) = \sigma^{-1} \exp\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right) \exp\left[-\exp\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)\right]$	$\mu=1.68, \sigma=0.063$
作物净初级生产力 Net primary productivity	$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}\right]$	$\mu=943.34, \sigma=55.45$
作物实际蒸散发 Actual evapotranspiration	$f(x) = \frac{\exp\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)}{\sigma\left[1 + \exp\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)\right]^2}$	$\mu=577.15, \sigma=11.53$
年平均气温 Annual mean air temperature	$f(x) = \frac{1}{\sigma} \exp\left[-\left(1 + k \frac{x-\mu}{\sigma}\right)^{-\frac{1}{k}}\right] \left[1 + k \frac{x-\mu}{\sigma}\right]^{-1-\frac{1}{k}}$	$k=-0.47, \sigma=0.57, \mu=12.81$
年日照时数 Sunshine duration	$f(x) = \frac{1}{\sigma} \exp\left[-\left(1 + k \frac{x-\mu}{\sigma}\right)^{-\frac{1}{k}}\right] \left[1 + k \frac{x-\mu}{\sigma}\right]^{-1-\frac{1}{k}}$	$k=-0.34, \sigma=166.58, \mu=2414.43$
年降水量 Annual precipitation	$f(x) = \frac{1}{\sigma} \exp\left[-\left(1 + k \frac{x-\mu}{\sigma}\right)^{-\frac{1}{k}}\right] \left[1 + k \frac{x-\mu}{\sigma}\right]^{-1-\frac{1}{k}}$	$k=-0.32, \sigma=92.76, \mu=481.95$

WUE、NPP、ETa、Tmean、Sun、Pre 6个随机变量的边缘分布函数，拟合情况如图1所示。柱状图为各随机变量观测样本的概率密度，表示为区间内

样本量与样本总量的比值再除以区间长度，柱状图面积的总和等于1；点划线是根据RMSE最小准则所选定的边缘分布函数计算的概率密度函数，不难

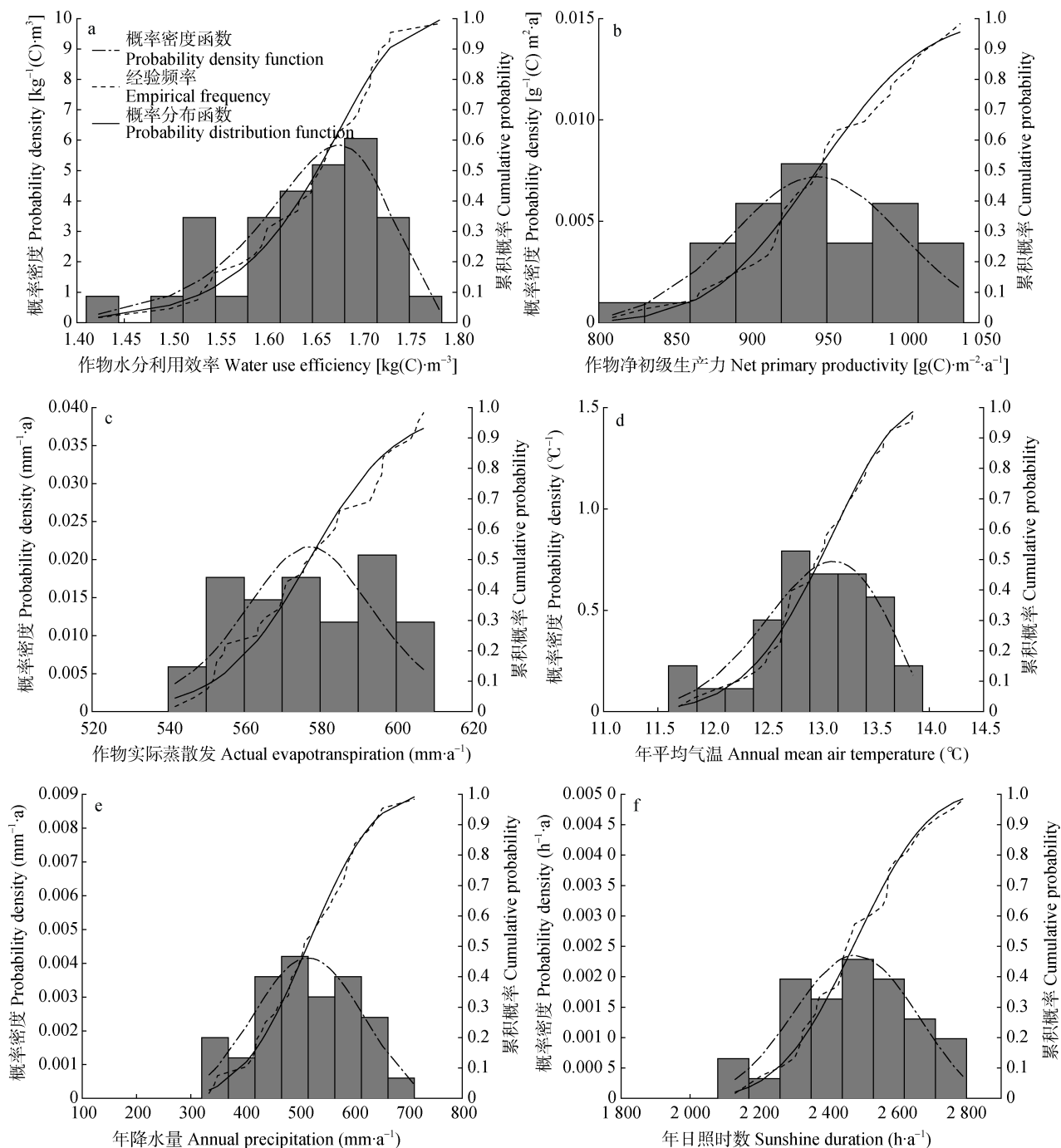


图 1 1980—2013 年研究区作物水分利用效率(a)、作物净初级生产力(b)、作物实际蒸散发(c)、年平均气温(d)、年降水量(e)和年日照时数(f)概率分布拟合情况

Fig. 1 The probability distribution fitting of water use efficiency (a), net primary productivity (b), actual evapotranspiration (c), annual mean air temperature (d), annual precipitation (e), and sunshine duration (f) of the Beijing-Tianjin-Hebei Plain from 1980 to 2013

发现, 概率密度函数能够较好地反映各随机变量的概率分布情况。图1中虚线表示各随机变量的经验频率, 实线则表示边缘分布函数拟合的理论累计概率, 结果表明根据RMSE最小准则所选定的边缘分布函数拟合情况较好, 参数估计合理, 因此, WUE、NPP和ETa分布服从EV分布、正态分布和Logistic分布, Tmean、Sun和Pre服从GEV分布。

### 3.2 WUE与相关变量的Copula联合分布拟合及检验

Copula函数能够连接两个随机变量的边缘分布函数, 从而构建两变量联合分布函数。选用Gaussian、Frank、AMH、FGM、Cubic 5种形式的Copula函数, 构建WUE-NPP、WUE-ETa、WUE-Tmean、WUE-Pre、WUE-Sun 5组两变量联合分布函数。采用MvCAT工具箱的MCMC方法估计Copula函数待定参数 $\theta$ , 并进

行K-S检验，结果如表4所示。对于WUE-NPP等5组联合分布而言，在0.01的显著性水平下，Gaussian、Frank、AMH、FGM、Cubic形式的Copula函数拟合结果的 $D_n$ 值均小于 $D_{34,0.01}$ ，通过K-S检验，表明上述5种形式的Copula函数均可用于拟合WUE-NPP、WUE-ETa、WUE-Tmean、WUE-Pre、WUE-Sun联合分布，需要进一步比较拟合结果的RMSE和AIC选择最合适的Copula函数。

表5为5种Copula函数分别拟合WUE-NPP、WUE-ETa、WUE-Tmean、WUE-Pre、WUE-Sun 5组联合分布的RMSE和AIC，RMSE和AIC越小则拟合结果越好。Gaussian形式的Copula函数对WUE-NPP和WUE-ETa两组联合分布的拟合结果最优；AMH形式的Copula函数对WUE-Pre和WUE-Sun两组联合

分布的拟合结果最优；对于WUE-Tmean联合分布，Cubic形式的Copula函数拟合结果的RMSE和AIC最小，但表4所给出的该Cubic函数的参数估计值 $\theta = -1$ ，在取值范围的边界处收敛，可能会引起不确定性，因此，选择次优的FGM形式的Copula函数更合适。

图2为Gaussian形式Copula函数对WUE-NPP和WUE-ETa联合分布的拟合情况，FGM形式Copula函数对WUE-Tmean联合分布的拟合情况，以及AMH形式Copula函数对WUE-Pre和WUE-Sun联合分布的拟合情况。横轴为Copula联合分布函数计算的理论概率，纵轴为经验频率，图2中由经验频率与理论概率构成的点分布在45°斜线附近，且 $R^2$ 均在0.97以上，表明选取的Copula函数对各联合分布的拟合情况较好，能够反映WUE-NPP等5组联合概率分布情况。

表 4 1980—2013 年研究区作物水分利用效率与各相关变量联合分布的 Copula 函数 K-S 检验及参数估计值  
Table 4 The K-S test and estimated parameters of each Copula function for the joint probability distribution of water use efficiency and other relevant variables of the Beijing-Tianjin-Hebei Plain from 1980 to 2013

联合分布 Joint probability distribution	Gaussian		Frank		AMH		FGM		Cubic	
	$D_n$	$\theta$	$D_n$	$\theta$	$D_n$	$\theta$	$D_n$	$\theta$	$D_n$	$\theta$
WUE-NPP	0.060***	0.85	0.065***	9.06	0.093***	1.00	0.121***	1.00	0.173***	2.00
WUE-ETa	0.098***	0.16	0.097***	0.88	0.098***	0.44	0.098***	0.45	0.082***	-1.00
WUE-Tmean	0.123***	-0.04	0.124***	-0.36	0.123***	-0.16	0.125***	-0.19	0.120***	-1.00
WUE-Pre	0.082***	-0.14	0.083***	-0.75	0.079***	-0.48	0.082***	-0.39	0.085***	-1.00
WUE-Sun	0.056***	0.23	0.058***	1.30	0.058***	0.60	0.058***	0.66	0.067***	-0.47

$D_{34,0.01} = 0.2728$ ;  $D_{34,0.05} = 0.2275$ ;  $D_{34,0.01} = 0.2048$ 。\*\*\*表示在 1% 的显著性水平下通过 K-S 检验。WUE-NPP: 作物水分利用效率和作物净初级生产力的联合分布; WUE-ETa: 作物水分利用效率和作物实际蒸散发的联合分布; WUE-Tmean: 作物水分利用效率和年平均气温的联合分布; WUE-Pre: 作物水分利用效率和年降水量的联合分布; WUE-Sun: 作物水分利用效率和年日照时数的联合分布。“\*\*\*” means passing K-S test at significance level of 1%. WUE-NPP: the joint probability distribution of water use efficiency and net primary productivity. WUE-ETa: the joint probability distribution of water use efficiency and actual evapotranspiration. WUE-Tmean: the joint probability distribution of water use efficiency and annual mean air temperature. WUE-Pre: the joint probability distribution of water use efficiency and annual precipitation. WUE-Sun: the joint probability distribution of water use efficiency and sunshine duration.

表 5 1980—2013 年研究区作物水分利用效率与各相关变量联合分布的 Copula 函数 RMSE 和 AIC 值  
Table 5 The RMSE and AIC values of each Copula function for the joint probability distribution function of water use efficiency and other relevant variables of the Beijing-Tianjin-Hebei Plain from 1980 to 2013

联合分布 Joint probability distribution	Gaussian		Frank		AMH		FGM		Cubic	
	RMSE	AIC	RMSE	AIC	RMSE	AIC	RMSE	AIC	RMSE	AIC
WUE-NPP	<b>0.023</b>	<b>-255.06</b>	0.024	-250.48	0.050	-201.88	0.065	-184.12	0.094	-159.08
WUE-ETa	<b>0.036</b>	<b>-222.92</b>	0.037	-222.18	0.037	-222.84	0.037	-222.37	0.038	-220.31
WUE-Tmean	0.046	-208.07	0.045	-208.41	0.045	-208.30	0.045	-208.44	<b>0.045</b>	<b>-209.55</b>
WUE-Pre	0.032	-232.02	0.032	-231.95	<b>0.031</b>	<b>-232.82</b>	0.032	-232.15	0.033	-230.09
WUE-Sun	0.025	-248.38	0.025	-248.19	<b>0.024</b>	<b>-251.00</b>	0.025	-248.65	0.032	-232.31

WUE-NPP: 作物水分利用效率和作物净初级生产力的联合分布; WUE-ETa: 作物水分利用效率和作物实际蒸散发的联合分布; WUE-Tmean: 作物水分利用效率和年平均气温的联合分布; WUE-Pre: 作物水分利用效率和年降水量的联合分布; WUE-Sun: 作物水分利用效率和年日照时数的联合分布。针对每组联合分布，5 个备选 Copula 函数的拟合结果中最小的 RMSE 和 AIC 加粗，表明拟合结果最优，相应的 Copula 函数用于描述作物水分利用效率和各相关变量的联合分布情况。WUE-NPP: the joint probability distribution of water use efficiency and net primary productivity. WUE-ETa: the joint probability distribution of water use efficiency and actual evapotranspiration. WUE-Tmean: the joint probability distribution of water use efficiency and annual mean air temperature. WUE-Pre: the joint probability distribution of water use efficiency and annual precipitation. WUE-Sun: the joint probability distribution of water use efficiency and sunshine duration. The smallest RMSE and AIC among 5 candidate Copula functions was bolded, standing for the best fitting of the joint probability distribution of water use efficiency and other relevant variables.

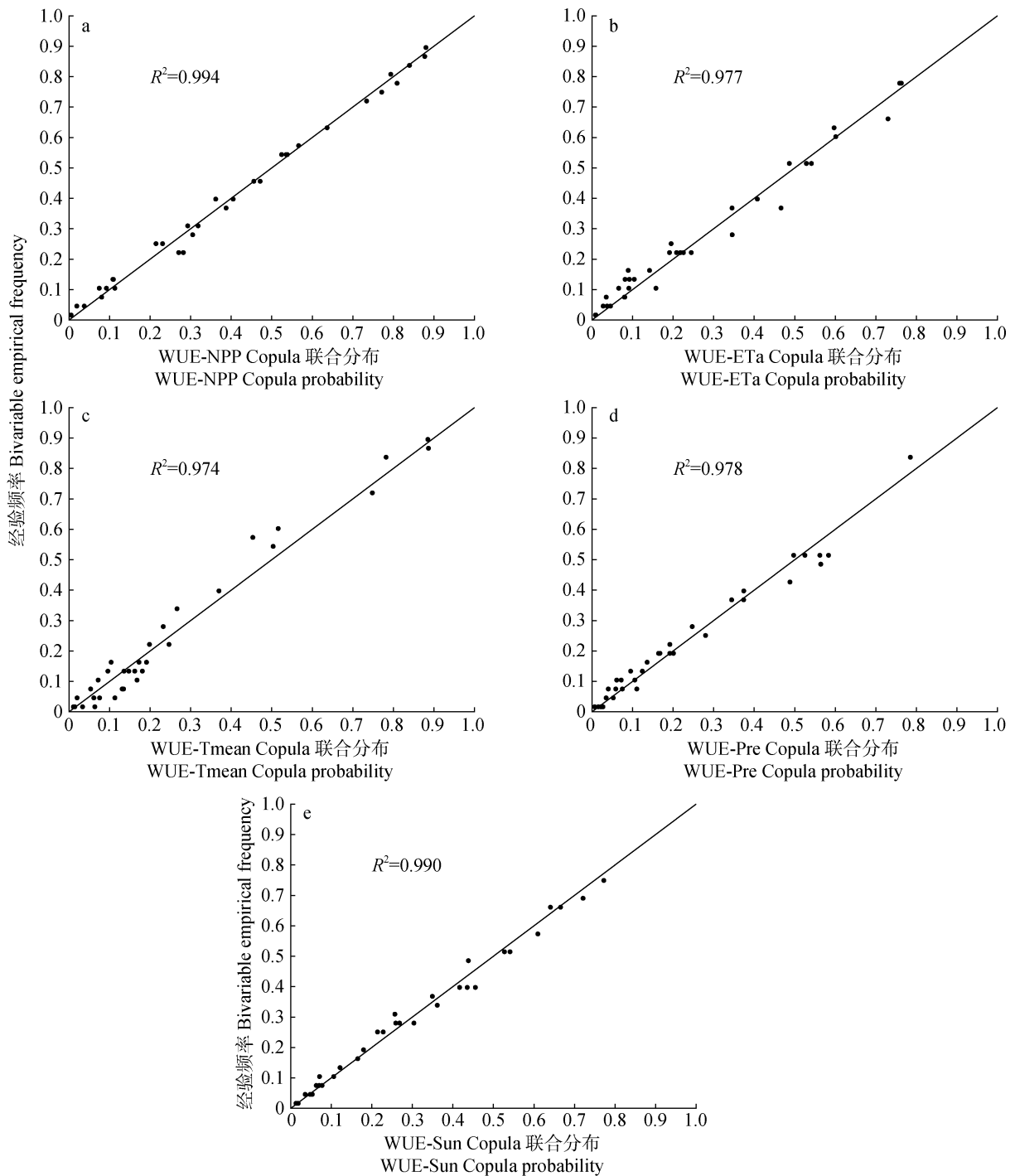


图 2 1980—2013 年研究区作物水分利用效率分别与作物净初级生产力(a)、作物实际蒸散发(b)、年平均气温(c)、年降水量(d)、年日照时数(e)的联合分布的拟合情况

Fig. 2 The Copula fitting of the joint probability distribution of water use efficiency and net primary productivity (a), water use efficiency and actual evapotranspiration (b), water use efficiency and annual mean air temperature (c), water use efficiency and annual precipitation (d), and water use efficiency and sunshine duration (e) of the Beijing-Tianjin-Hebei Plain from 1980 to 2013

WUE-NPP: 作物水分利用效率和作物净初级生产力的联合分布; WUE-ETa: 作物水分利用效率和作物实际蒸散发的联合分布; WUE-Tmean: 作物水分利用效率和年平均气温的联合分布; WUE-Pre: 作物水分利用效率和年降水量的联合分布; WUE-Sun: 作物水分利用效率和年日照时数的联合分布。WUE-NPP: the joint probability distribution of water use efficiency and net primary productivity. WUE-ETa: the joint probability distribution of water use efficiency and actual evapotranspiration. WUE-Tmean: the joint probability distribution of water use efficiency and annual mean air temperature. WUE-Pre: the joint probability distribution of water use efficiency and annual precipitation. WUE-Sun: the joint probability distribution of water use efficiency and sunshine duration.



### 3.3 WUE 条件概率分析

聚焦WUE受NPP、ETa、Tmean、Pre、Sun等变量大小的影响，根据各变量边缘分布函数上33%和67%两个分位点，将NPP、ETa、Tmean、Pre、Sun划分为低(Low, L)、中(Medium, M)、高(High, H)3种取值情形，使各变量为低(L)、中(M)、高(H)取值的可能性均为33%左右，如表6所示，并在此基础上建立WUE条件概率分布。

本文的WUE条件概率分布是指，在变量X(NPP、ETa、Tmean、Pre、Sun)特定取值条件下，WUE

大于某一数值y的可能性。当X为较低取值条件时 ( $X \leq x_{a=0.33}$ )，WUE条件概率分布表示为  $P_{X|L} = P(WUE > y | X \leq x_{a=0.33})$ ，可由式(7)计算；当X为中等取值条件时( $x_{a=0.33} < X \leq x_{a=0.67}$ )，WUE条件概率分布表示为  $P_{X|M} = P(WUE > y | x_{a=0.33} < X \leq x_{a=0.67})$ ，可由式(8)计算；当X为较高取值条件时( $X > x_{a=0.67}$ )，WUE条件概率分布表示为  $P_{X|H} = P(WUE > y | X > x_{a=0.67})$ ，可由式(9)计算。

表 6 研究区作物水分利用效率的相关变量的取值条件

Table 6 The value conditions of driving factors for water use efficiency of crops in the Beijing-Tianjin-Hebei Plain

变量 Variable	取值范围 Value condition		
	低 Low (L) ( $X \leq x_{a=0.33}$ )	中 Medium (M) ( $x_{a=0.33} < X \leq x_{a=0.67}$ )	高 High (H) ( $x_{a=0.67} < X$ )
作物净初级生产力 Net primary productivity (NPP) [ $g(C) \cdot m^{-2} \cdot a^{-1}$ ]	NPP $\leq 918.95$	918.95 < NPP $\leq 967.73$	967.73 < NPP
作物实际蒸散发 Actual evapotranspiration (ETa) ( $mm \cdot a^{-1}$ )	ETa $\leq 568.99$	568.99 < ETa $\leq 585.31$	585.31 < ETa
年平均气温 Annual mean air temperature (Tmean) ( )	Tmean $\leq 12.75$	12.75 < Tmean $\leq 13.23$	13.23 < Tmean
年降水量 Annual precipitation (Pre) ( $mm \cdot a^{-1}$ )	Pre $\leq 472.12$	472.12 < Pre $\leq 556.31$	556.31 < Pre
年日照时数 Sunshine duration (Sun) ( $h \cdot a^{-1}$ )	Sun $\leq 2\ 396.94$	2 396.94 < Sun $\leq 2\ 545.67$	2 545.67 < Sun

图3为NPP、ETa、Tmean、Pre、Sun分别在低、中、高取值条件下的WUE条件概率分布，所有的WUE的条件概率均随WUE取值的增大而减小，符合WUE概率分布规律。对于NPP、ETa和Sun而言，WUE条件概率均存在  $P_{X|H} > P_{X|M} > P_{X|L}$  的关系，说明NPP、ETa和Sun越大则WUE大于任一特定取值的可能性越高；相反，对于Tmean和Pre而言，WUE条件概率则存在  $P_{X|H} < P_{X|M} < P_{X|L}$  的关系。

进一步分析京津冀平原耕地WUE对NPP、ETa、Tmean、Pre、Sun取值大小的敏感程度，从图3不难发现，WUE条件概率在各变量X分别为高、低取值条件下差别最大，因此，本文通过计算各变量X分别在高、低取值条件下的WUE条件概率差值来衡量WUE对各变量取值大小的敏感程度，即  $\Delta P_X = |P_{X|H} - P_{X|L}|$ ，结果如图4所示， $\Delta P_{NPP} > \Delta P_{Sun} > \Delta P_{ETa} \approx \Delta P_{Pre} > \Delta P_{Tmean}$ ，其中  $\Delta P_{NPP}$  远大于其他几个变量相应的  $\Delta P_X$ ，说明京津冀平原耕地WUE对NPP大小最为敏感，对Tmean大小的敏感程度最弱。

图5为WUE相关变量分别为低、中、高3种取值条件下NPP、ETa、Tmean、Pre、Sun对WUE的影响。当各相关变量为较低取值条件时， $P_{NPP|L}$  明显小于ETa、Tmean、Pre和Sun为较低取值条件的WUE条件

概率  $P_{X|L}$  (X=ETa、Tmean、Pre、Sun)，具体考察WUE大于多年平均值  $1.64 \text{ kg}(C) \cdot m^{-3}$  的条件概率， $P(WUE > 1.64 | NPP \leq x_{a=0.33})$  仅为0.13，而其他4个变量对应的WUE条件概率  $P_{X|L}$  在0.44以上，且WUE取值大于  $1.70 \text{ kg}(C) \cdot m^{-3}$  时  $P_{NPP|L}$  迅速衰减为0，说明较低的NPP会明显抑制WUE的大小。将WUE相关变量的大小提高至中等取值范围，如图5b所示， $P_{ETa|M} \approx P_{Tmean|M} \approx P_{Pre|M} \approx P_{Sun|M}$ ，说明中等取值大小的ETa、Tmean、Pre、Sun对WUE的影响无显著差异，而中等大小的NPP对WUE的影响则表现出明显的差异，当WUE的取值范围小于  $1.65 \text{ kg}(C) \cdot m^{-3}$  时， $P_{NPP|M}$  高于  $P_{X|M}$  (X=ETa、Tmean、Pre、Sun)，且  $P_{NPP|M}$  较  $P_{NPP|L}$  有了大幅显著提升，但NPP在WUE高值区域 [ $WUE > 1.70 \text{ kg}(C) \cdot m^{-3}$ ] 仍表现出异于其他4个变量的抑制作用。进一步将相关变量大小提高至较高取值范围，如图5c所示， $P_{NPP|H}$  在WUE所有取值范围内均明显大于其他4个WUE条件概率  $P_{X|H}$  (X=ETa、Tmean、Pre、Sun)，且  $P_{NPP|H}$  在较大范围接近于1，进一步说明提高NPP对WUE的大小有明显的保障作用。综上结果分析表明，在5个相关变量中，NPP对WUE的影响最大，在京津冀平原采用在控制

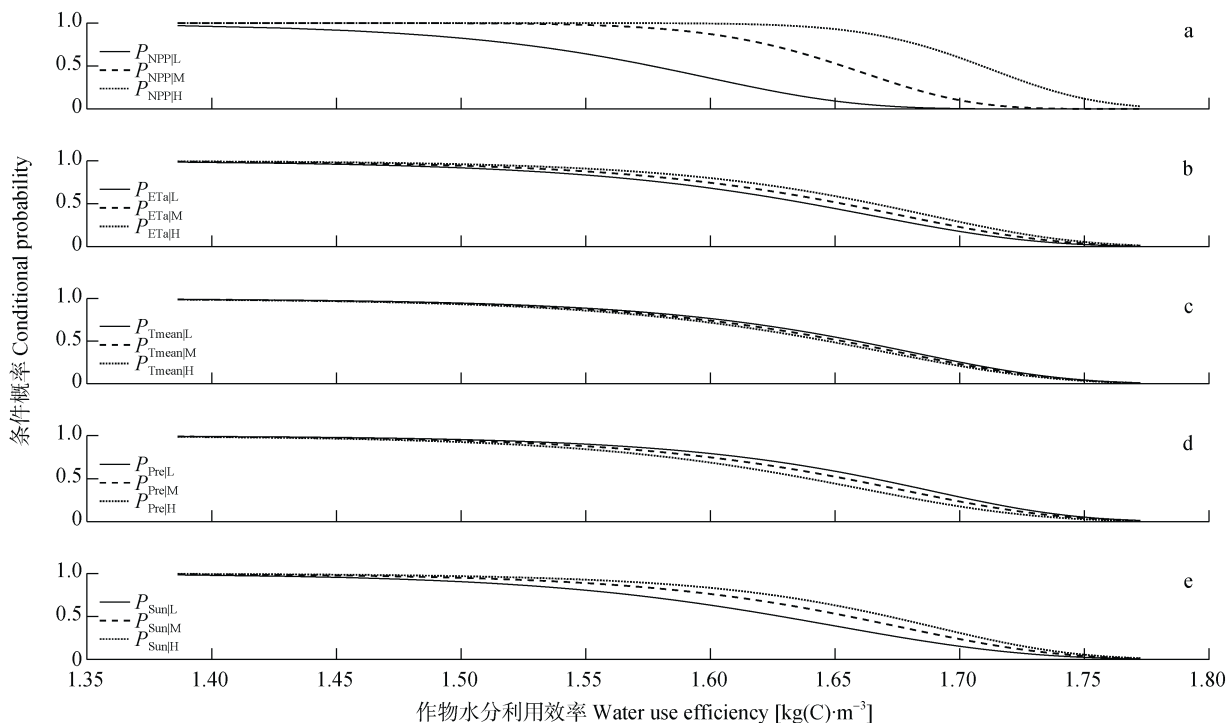


图 3 作物净初级生产力(NPP, a)、作物实际蒸散发(ETa, b)、年平均气温(Tmean, c)、年降水量(Pre, d)、年日照时数(Sun, e)在低(L)、中(M)、高(H)取值条件下的作物水分利用效率的条件概率分布

Fig. 3 The conditional probability distribution of water use efficiency under low (L), medium (M), and high (H) value conditions of net primary productivity (NPP, a), actual evapotranspiration (ETa, b), annual mean air temperature (Tmean, c), annual precipitation (Pre, d), and sunshine duration (Sun, e) respectively

$P_{X|L}$ ,  $P_{X|M}$ , and  $P_{X|H}$  are the conditional probability distribution of water use efficiency under low (L), medium (M), and high (H) value conditions of net primary productivity, actual evapotranspiration, annual mean air temperature, annual precipitation, and sunshine duration.

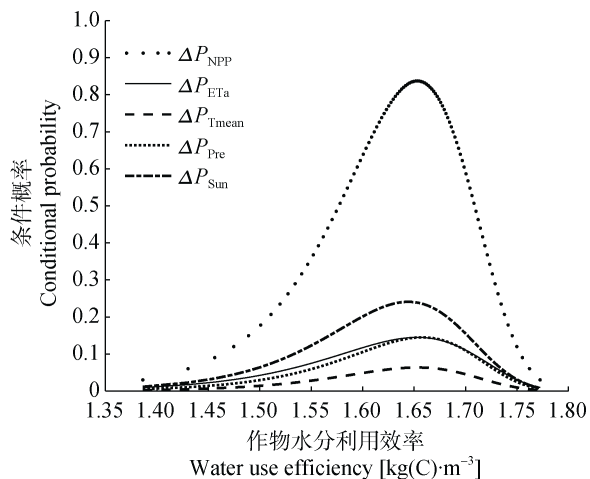


图 4 研究区作物水分利用效率对相关变量大小的敏感程度

Fig. 4 The sensitivity of water use efficiency to the value of driving factors

$\Delta P_{NPP}$ 、 $\Delta P_{ETa}$ 、 $\Delta P_{Tmean}$ 、 $\Delta P_{Pre}$ 、 $\Delta P_{Sun}$  分别代表当作物净初级生产力(NPP)、实际蒸散发(ETa)、年平均气温(Tmean)、年降水量(Pre)、年日照时数(Sun)分别在在高(H)、低(L)取值条件下作物水分利用效率条件概率差值。 $\Delta P_{NPP}$ 、 $\Delta P_{ETa}$ 、 $\Delta P_{Tmean}$ 、 $\Delta P_{Pre}$ 、 $\Delta P_{Sun}$  stands for the absolute difference of the conditional probability of water use efficiency when net primary productivity, actual evapotranspiration, annual mean air temperature, annual precipitation, and sunshine duration under high and low value condition.

耗水的条件下提高NPP来提高WUE的相应策略可能比采用在控制产量的条件下减少耗水的策略更有效。

#### 4 结论与讨论

本文以水资源紧缺的京津冀平原为研究区,应用 Copula 函数理论分别建立 WUE 与 NPP、ETa、Tmean、Pre、Sun 5 个相关变量的 5 组联合分布函数,采用条件概率分析研究了 WUE 与 5 个潜在驱动因子之间的关系,得到以下结论:

1)WUE条件概率指驱动因子在不同取值条件下 WUE大于任一特定取值的可能性。驱动因子NPP、ETa、Sun取值越大, WUE大于任一特定取值的可能性越大;而驱动因子Tmean和Pre取值越小, WUE大于任一特定取值的可能性越大。

2)若以各驱动因子分别在高、低取值条件下的 WUE条件概率的差值来反映WUE对各驱动因子的敏感程度,结果显示,京津冀平原耕地WUE对NPP的大小最为敏感,而后依次是Sun、ETa、Pre、Tmean。

3)作物 WUE 同时受光合作用和蒸腾作用两个生理过程控制,较难确定光合和蒸腾对 WUE 的驱动关系,本文从 WUE 与驱动因子的联合分布和条

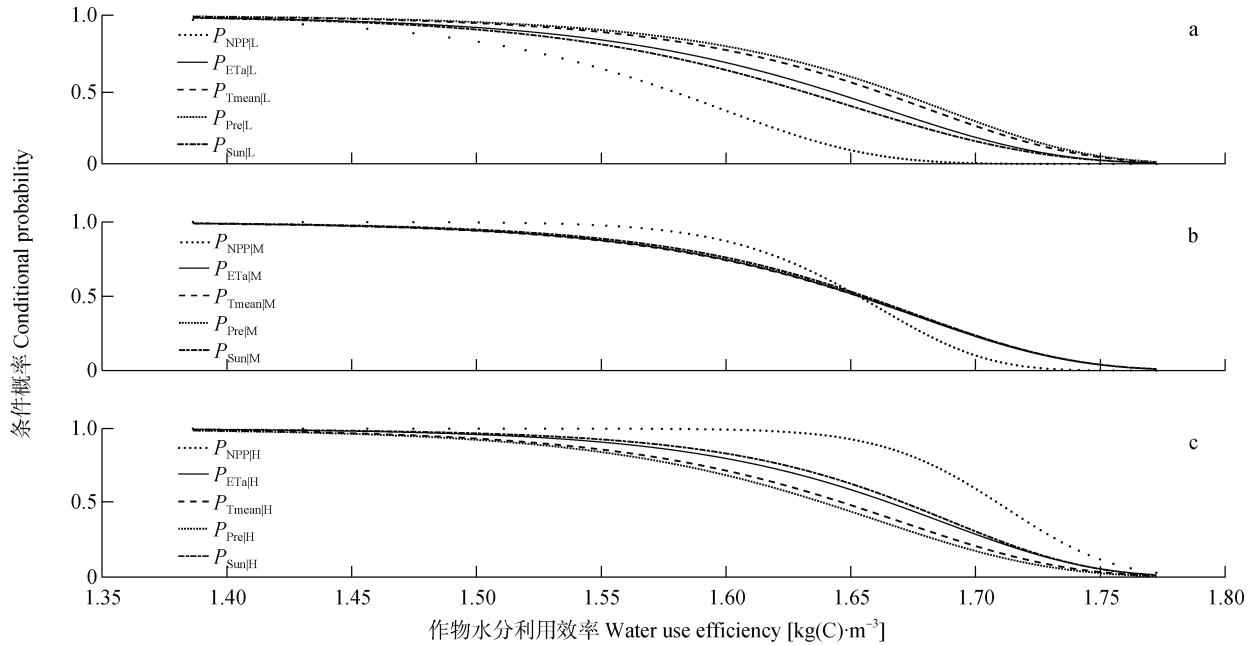


图 5 研究区作物水分利用效率受作物净初级生产力(NPP)、作物实际蒸散发(ETa)、年平均气温(Tmean)、年降水量(Pre)和年日照时数(Sun)在低(a)、中(b)、高(c)取值的影响对比

Fig. 5 The comparison of water use efficiency influenced by driving factors with low (a), medium (b), and high (c) value conditions of net primary productivity (NPP), actual evapotranspiration (ETa), annual mean air temperature (Tmean), annual precipitation (Pre), and sunshine duration (Sun)

件概率分析指出, 在京津冀平原采用在控制耗水的条件下提高NPP来提高WUE的相应策略可能比采用在控制产量的条件下减少耗水的策略更有效。

本文在建立 WUE-NPP、WUE-ETa、WUE-Tmean、WUE-Pre、WUE-Sun联合分布函数的基础上, 将变量 $X$  ( $X$ =NPP、ETa、Tmean、Pre、Sun)设置为低、中、高3种不同取值条件, 通过计算变量 $X$ 不同取值条件下的WUE条件概率分布, 分析WUE与各驱动因子的关系。对于变量NPP、ETa、Sun, WUE条件概率存在  $P_{X|H} > P_{X|M} > P_{X|L}$  的关系, 说明NPP、ETa、Sun越大则WUE大于任一特定取值的可能性就越大; 而对于变量Tmean和Pre, WUE条件概率存在  $P_{X|H} < P_{X|M} < P_{X|L}$  的关系, 说明Tmean和Pre在一定程度上的减小使WUE大于任一特定取值的可能性就越大。较多WUE与相关变量的研究中, 线性回归是最常用的方法之一, 如Mo等<sup>[24]</sup>在中国东北松花江流域模拟了1999—2010年的WUE、蒸散发量(ET)、总初级生产力(GPP), 并通过线性回归指出WUE与ET存在较强的负相关关系, WUE与降水量存在较弱的负相关关系, 且WUE分别与GPP和净辐射存在较弱的正相关关系。

本文采用的WUE被定义为NPP和ETa的比值, 由于WUE是NPP直接计算而来, 两者之间本身存在较大的相关关系。Gilbert等<sup>[25]</sup>指出在WUE的研究中,

不宜将WUE与作物产出或作物蒸散发建立线性回归, 因为WUE中既包含有作物产出项也包含有作物蒸散发项, 这种形式的线性回归可能会得出不正确的结果。本文基于Copula函数理论的研究方法不需要假设WUE与驱动因子之间存在线性关系或构建特定的多元回归方程, 在WUE的研究中更具有一般性, 给WUE研究提供了新的视角和方法。

虽然WUE直接由NPP和ETa计算而来, 但NPP和ETa观测值对WUE观测值大小的影响方向可以不一致, 比如WUE的提高可能由以下事件导致: 1)NPP提高, ETa减小; 2)NPP提高, ETa不变; 3)NPP提高, ETa提高, 且NPP提高的幅度大于ETa提高的幅度; 4)NPP不变, ETa减小; 5)NPP减小, ETa减小, 且ETa减小的幅度大于NPP减小的幅度。在概率空间中, 并不需要对相关性做出特定要求, 例如事件A包含事件B, 譬如事件A是自然数, 事件B是偶数, 那么事件A和事件B的相关性就很高。但是从概率空间可以判断, 当事件A发生时, 事件B不一定发生; 然而事件B发生了, 事件A就一定发生。采用Copula函数理论来探讨NPP和ET对WUE的驱动, 就是为探讨影响的可能性。

WUE 由光合作用和蒸腾作用两个生理过程控制, 且光合作用和蒸腾作用两个过程受到  $\text{CO}_2$  浓度、温度、湿度、光照强度等影响, 动态响应机制十分复杂, 而且作物叶片的光合作用与蒸腾作用在对驱

动因子的响应过程中有趋同性, 很难确定两个过程分别处于什么状态会使 WUE 最优<sup>[26]</sup>。本文通过条件概率分析了 NPP、ETa、Tmean、Pre 和 Sun 不同取值大小对京津冀平原耕地 WUE 的影响, NPP 越大则 WUE 大于任一特定取值的可能性越大, 且效果较其他变量明显, 说明在京津冀平原采用提高 NPP 的相应策略来提高 WUE 可能更有效。京津冀地区面临严重的水资源短缺问题, 根据本文的结论, 在缓解地区水资源压力时并不能单独以提高 WUE 作为水资源管理的目标, 而应当在控制水资源用量的基础上进一步实现高效用水, 这与水利部于 2016 年发布的《京津冀协同发展水利专项规划》工作方针是一致的, “节水优先、空间均衡、系统治理、两手发力” “以水资源水环境承载力为刚性约束, 以水资源高效循环利用为前提”。

## 参考文献 References

- [1] 鲍超, 贺东梅. 京津冀城市群水资源开发利用的时空特征与政策启示[J]. 地理科学进展, 2017, 36(1): 58–67  
BAO C, HE D M. Spatiotemporal characteristics of water resources exploitation and policy implications in the Beijing-Tianjin-Hebei Urban Agglomeration[J]. Progress in Geography, 2017, 36(1): 58–67
- [2] 杜朝阳, 于静洁. 京津冀地区适水发展问题与战略对策[J]. 南水北调与水利科技, 2018, 16(4): 17–25  
DU C Y, YU J J. Issues on the sustainable development of Beijing-Tianjin-Hebei Region based on the limited water resources[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2018, 16(4): 17–25
- [3] ZHANG X L, REN L, WAN L. Assessing the trade-off between shallow groundwater conservation and crop production under limited exploitation in a well-irrigated plain of the Haihe River basin using the SWAT model[J]. Journal of Hydrology, 2018, 567: 253–266
- [4] 王学, 李秀彬, 辛良杰. 河北平原冬小麦播种面积收缩及由此节省的水资源量估算[J]. 地理学报, 2013, 68(5): 694–707  
WANG X, LI X B, XIN L J. Impact of the shrinking winter wheat sowing area on agricultural water consumption in the Hebei Plain[J]. Acta Geographica Sinica, 2013, 68(5): 694–707
- [5] 尚松浩, 蒋磊, 杨雨亭. 基于遥感的农业用水效率评价方法研究进展[J]. 农业机械学报, 2015, 46(10): 81–92  
SHANG S H, JIANG L, YANG Y T. Review of remote sensing-based assessment method for irrigation and crop water use efficiency[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(10): 81–92
- [6] 冯保清. 我国不同尺度灌溉用水效率评价与管理研究[D]. 北京: 中国水利水电科学研究院, 2013  
FENG B Q. Study on the evaluation and management of irrigation water use efficiency for different scales in country-wide[D]. Beijing: China Institute of Water Resources & Hydropower Research, 2013
- [7] MO X G, LIU S X, LIN Z H, et al. Regional crop yield, water consumption and water use efficiency and their responses to climate change in the North China Plain[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2009, 134(1/2): 67–78
- [8] GUO R P, LIN Z H, MO X G, et al. Responses of crop yield and water use efficiency to climate change in the North China Plain[J]. Agricultural Water Management, 2010, 97(8): 1185–1194
- [9] MO X, LIU S, HU S, et al. Sensitivity of terrestrial water and carbon fluxes to climate variability in semi-humid basins of Haihe River, China[J]. Ecological Modelling, 2017, 353: 117–128
- [10] SUN S B, SONG Z L, WU X C, et al. Spatio-temporal variations in water use efficiency and its drivers in China over the last three decades[J]. Ecological Indicators, 2018, 94: 292–304
- [11] 赵姜, 孟鹤, 龚晶. 京津冀地区农业全要素用水效率及影响因素分析[J]. 中国农业大学学报, 2017, 22(3): 76–84  
ZHAO J, MENG H, GONG J. Measurement of total factor agricultural water efficiency and analysis of influential factors in Jing-Jin-Ji area[J]. Journal of China Agricultural University, 2017, 22(3): 76–84
- [12] 陈洪斌. 我国省际农业用水效率测评与空间溢出效应研究[J]. 干旱区资源与环境, 2017, 31(2): 85–90  
CHEN H B. Provincial agricultural water use efficiency evaluation and spatial spillover effect in China[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2017, 31(2): 85–90
- [13] 桑燕芳, 王中根, 刘昌明. 水文时间序列分析方法研究进展[J]. 地理科学进展, 2013, 32(1): 20–30  
SANG Y F, WANG Z G, LIU C M. Research progress on the time series analysis methods in hydrology[J]. Progress in Geography, 2013, 32(1): 20–30
- [14] 郭生练, 闫宝伟, 肖义, 等. Copula 函数在多变量水文分析计算中的应用及研究进展[J]. 水文, 2008, 28(3): 1–7  
GUO S L, YAN B W, XIAO Y, et al. Multivariate hydrological analysis and estimation[J]. Journal of China Hydrology, 2008, 28(3): 1–7
- [15] 熊立华, 郭生练, 肖义, 等. Copula 联结函数在多变量水文频率分析中的应用[J]. 武汉大学学报: 工学版, 2005, 38(6): 16–19  
XIONG L H, GUO S L, XIAO Y, et al. Application of copulas to multivariate hydrological frequency analysis[J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2005, 38(6): 16–19
- [16] SALVADORI G, DE MICHELE C. Multivariate multiparameter extreme value models and return periods: A copula approach[J]. Water Resources Research, 2010, 46(10): 219–233
- [17] HAO Z C, HAO F H, SINGH V P, et al. Quantitative risk assessment of the effects of drought on extreme temperature in eastern China[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2017, 122(17): 9050–9059
- [18] MADADGAR S, AGHAKOUCHAK A, FARAHMAND A, et al. Probabilistic estimates of drought impacts on agricultural production[J]. Geophysical Research Letters, 2017, 44(15):

- 7799–7807
- [19] 李浩鑫, 邵东国, 尹希, 等. 基于主成分分析和 Copula 函数的灌溉用水效率评价方法[J]. 农业工程学报, 2015, 31(11): 96–102  
LI H X, SHAO D G, YIN X, et al. Evaluation method for irrigation-water use efficiency based on principle component analysis and Copula function[J]. Transactions of the CSEA, 2015, 31(11): 96–102
- [20] ZHAO Y, ZHANG J P, XIAO W H. Study on the joint probability distribution of irrigation water volume and irrigation water efficiency[J]. Water Science & Technology: Water Supply, 2015, 15(4): 802–809
- [21] MO X G, CHEN X J, HU S, et al. Attributing regional trends of evapotranspiration and gross primary productivity with remote sensing: a case study in the North China Plain[J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2017, 21(1): 295–310
- [22] SADEGH M, RAGNO E, AGHAKOUCHAK A. Multivariate copula analysis toolbox (MvCAT): describing dependence and underlying uncertainty using a Bayesian framework[J]. Water Resources Research, 2017, 53(6): 5166–5183
- [23] ZHANG L, SINGH V P. Bivariate flood frequency analysis using the copula method[J]. Journal of Hydrologic Engineering, 2006, 11(2): 150–164
- [24] MO X G, LIU S X, MENF D J, et al. Exploring the interannual and spatial variations of ET and GPP with climate by a physical model and remote sensing data in a large basin of Northeast China[J]. International Journal of Climatology, 2014, 34(6): 1945–1963
- [25] GILBERT M E, HERNANDEZ M I. How should crop water-use efficiency be analyzed? A warning about spurious correlations[J]. Field Crops Research, 2019, 235: 59–67
- [26] 姜寒冰, 张玉翠, 任晓东, 等. 作物水分利用效率研究方法及其尺度传递研究进展[J]. 中国生态农业学报, 2019, 27(1): 50–59  
JIANG H B, ZHANG Y C, REN X D, et al. A review of progress in research and scaling-up methods of crop water use efficiency[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2019, 27(1): 50–59