

Spatial-temporal Pattern of Water requirement in Xiliaohe Watershed

Rui Wang, Jiquan Zhang*, Feng Zhang, Enliang Guo, Meng Zhu, Danjun Li

School of Environment, Northeast Normal University, Institute of Natural Disaster Research, Northeast
Normal University, Changchun 130024, China

西辽河流域春玉米需水量时空演变

王蕊, 张继权*, 张峰, 郭恩亮, 朱萌, 李丹君

东北师范大学环境学院, 东北师范大学自然灾害研究所, 长春 130024, 中国

Abstract

Based on the climatic data from 23 meteorological stations throughout the Xiliaohe watershed during 1961 and 2010, every month's spring maize water requirement are calculated by Penman-Monteith model. In addition, Spatial distribution of water requirement in Xiliaohe watershed can be analyzed using the Mann-Kendall and Ordinary Kriging method. Conclusions are as follows: Water requirement in Xiliaohe watershed is positive correlation relationship with T-max, mean wind speed and hours of sunshine. It's negative correlated relationship with relative average humidity; As a whole, water requirement in the study area is on the decline. Every month's spring maize water requirement first increased and then decreased. Water requirement is highest in July and is lowest in May; The spatial distributional trend of water requirement is that water requirement decreased from mid-east region to all around. Water requirement is larger, the crop take more risk.

Keywords: Crop water requirement; Penman-Monteith model; Mann-Kendall; spatial interpolation; Xiliaohe watershed

摘要

利用西辽河流域及其周边 23 个站点

1961-2010 年的气象资料(最高温度、最低温度、平均相对湿度、平均风速和日照时数等), 采用 Penman-Monteith 模型对研究区春玉米各生育期需水量进行计算, 并通过 Mann-Kendall 检验法和普通克里格空间插值法对西辽河流域需水量进行时空演变分析。结果表明: 西辽河流域需水量与最高气温、平均风速、日照时数呈正相关关系, 与平均相对湿度呈负相关关系; 研究区 50a 需水量整体呈下降趋势, 各生育期需水量呈先增加后减少的趋势, 5 月需水量最低, 7 月需水量最高; 西辽河流域需水量空间分布呈以中-中东部高值区向四周呈辐射状递减的趋势, 需水量过大, 会造成该地区水资源存在潜在安全隐患。

关键词: 作物需水量; Penman-Monteith 模型; Mann-Kendall; 空间插值; 西辽河流域

1. 引言

水是人类赖以生存的物质基础, 随着社会经济的发展 and 人们生活水平的日益提高, 水资源的供需矛盾日益突出, 这不但威胁着人类用水安全问题, 还影响作物的正常生长。西辽河流域在区域和国家粮食安全中具有重要的地位, 近年来西辽河流域的取、用水量不断增加, 频繁出现河流断流现象、林木草场的矮化和退化等环境问题^[1], 因此该地区水资源供需情况及变化趋势备受人们的关注。

作物需水量(Crop Water Requirement), 是指生长在大面积上的无病虫害作物, 土壤水分和肥力适宜时, 在给定的生长环境中能取得高产潜力的条件下, 为满足植株蒸腾、棵间蒸发、

*通讯作者: 张继权, Zhangjq022@nenu.edu.cn

组成植株体的水量之和^[2]。目前有关作物需水量计算的研究方法很多,总体上可以分为三大类:第一类是“惯用法”,对于干旱作物需水量的计算常采用以产量为参数的经验公式,但是此方法对于水稻等的计算误差较大。积温法常被应用在水稻需水量的计算,日照时数法适用于太阳辐射比较稳定的夏季生长的作物需水量的计算^[3-6];第二类是直接计算作物需水量法,主要包括水面蒸发法和水量平衡法。第三类是通过参考作物需水量计算实际作物需水量,通常采用彭曼综合法,该方法已成为计算参考作物需水量的主要方法^[7]。本文拟采用 Mann-Kendall 趋势检验法和克里金空间插值法,揭示西辽河流域春玉米需水量的时空变化趋势,并分析了需水量和各气象因子的相关性。以期为该地区水资源利用研究提供基础数据,

为未来农业用水规划提供参考依据。

2. 材料与方法

2.1. 区域概况及数据来源

西辽河流域介于 116°32'E~124°30'E, 41°05'N~45°13'N, 地处中国北方农牧交错带的东段三北交界区^[8]。该区域属于暖温带半湿润气候向中温带半干旱气候的过渡带,具有强烈的大陆性特征,年平均气温为 5.0~6.5℃,年平均降水介于 330~550mm 之间^[9]。本文选取西辽河流域及其周边的 23 个地面气象台站 50 年的气象数据,气象数据来源于中国气象科学数据共享服务网,包括最高气温、最低气温、相对湿度、平均风速和日照时数等,时间序列为 1961-2010 年,研究区地理位置及气象台站分布如图 1 所示。

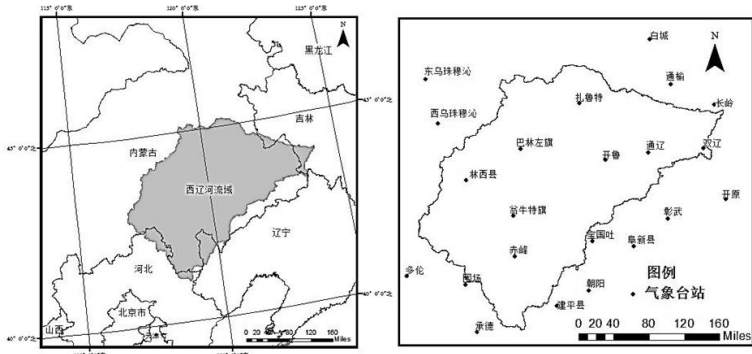


图 1 西辽河流域地理位置及气象台站分布图

2.2. 研究方法

2.2.1. FAO Penman-Monteith 模型

1998 年,联合国粮农组织 (FAO) 对 Penman-Monteith 模型进行修正,得到 Penman-Monteith(98)模型,该方法相对误差较小,得到国内外学者的广泛应用^[10]。本文选用 Penman-Monteith(98)模型对 ET₀ 进行计算,计算公式如下:

$$ET_c = \frac{0.40 \Delta (R_n - G) + r \frac{900}{T + 273} U_2 (e_s - e_a)}{\Delta + r (1 + 0.34 U_2)} \quad (1)$$

式中: ET₀ 为参考作物蒸散量 (mm/d); Δ 为饱和水汽压曲线斜率 (KPa/°C); R_n 为地表净辐射 (MJ/ (m²·d)); G 为土壤热通量 (MJ/ (m²·d)); r 为干湿表常数; T 为 2m 高处日

均气温 (°C); U₂ 为 2 米高处风速 (m/s); e_s 为饱和水汽压 (KPa); e_a 为实际水汽压 (KPa)。作物需水量系指在不考虑植株体水量及其他复杂的影响因素时,为了使作物获得最高产量所需要的水分^[7]。其公式如下:

$$ET_c = K_c \times ET_0 \quad (2)$$

式中 ET_c 为作物需水量 (mm/d); ET₀ 为作物潜在蒸散量; K_c 为作物系数,由于西辽河流域春玉米的生长期为 5 月 1 日-9 月 27 日,因此本文依据农业速查速算手册确定春玉米生育期的 K_c 值^[11],如表 1 所示。

表 1 西辽河流域各生育期春玉米 Kc 值

| 5 月 | 6 月 | 7 月 | 8 月 | 9 月 | 全生育期平均 |
|-----|------|------|------|------|--------|
| 0.2 | 0.58 | 1.57 | 1.61 | 0.66 | 0.89 |

2.2.2. Mann-Kendall 检验法

Mann-Kendall 检验法广泛应用于气象、水文学中，具有计算简便、突变时间明显且能直接判断其显著情况等优点^[12-14]。本文基于该方法对西辽河流域春玉米的需水量进行趋势和突变分析，其计算式如下：

$$S_K = \sum_{i=1}^k \sum \alpha_j \quad (k=2, 3, 4, \dots, n) \quad (3)$$

其中，

$$\alpha_{ij} = \begin{cases} 1 & x_i > x_j \\ 0 & x_i \leq x_j \end{cases} \quad 1 \leq j \leq i \quad (4)$$

定义统计量 UFK 为：

$$UF_k = \frac{[S_K - E(S_K)]}{\sqrt{var(S_K)}} \quad (k=2, 3, 4, \dots, n) \quad (5)$$

其中，

$$E(S_K) = K(K+1) / 4 \quad (6)$$

$$Var(S_K) = K(K-1)(2K+5) / 72 \quad (7)$$

将时间序列 x 按逆序排列，重复上述过程，使

$$\begin{cases} UB_k = -UF_K \\ K=n+1-k \end{cases} \quad (k=2, 3, 4, \dots, n) \quad (8)$$

式中，UFk 为标准正态分布，给定显著性水平 α，若|UF_i| > U_{α/2}时，则表示存在明显的趋势

变化。UFi>0 时，呈上升趋势；UFi<0 时，呈下降趋势。

2.2.3. CI 空间插值法

空间插值法有 IC（先插值再计算）和 CI（先计算再插值）两种，依据前人的研究经验可知，后者的精度更高^[15,16]。因此本研究运用 ArcGIS 软件中的普通克里格法对已有站点的数据进行 CI 空间插值，计算得到西辽河流域 50 年间逐月需水量，并分析其时空分布情况。

3. 结果与分析

3.1. 需水量与气象要素相关性分析

本文对西辽河流域 5-9 月的需水量与各气象要素进行了相关性分析。结果显示（表 2），西辽河流域的需水量与平均相对湿度的相关性最大，在春玉米整个生育期内，其相关性均超过了 95%的显著性水平，在 6、7、9 月超过了 99%的显著性，这说明西辽河流域对需水量影响最大的是平均相对湿度，且呈负相关的关系。与此同时，西辽河流域的需水量与最低温度的关系不显著，在 5、7、9 月呈负相关关系，6、8 月呈正相关关系。最高温度、平均风速、日照时数的相关性较强，均呈正相关的关系，最高温度和日照时数对需水量的影响基本一致，均在 6、7、8 月中较为明显，平均风速在 5、6、9 月的影响较大。综上所述，最高温度、平均相对湿度、平均风速和日照时数是影响西辽河流域春玉米需水量的主要因素，因此更好的缩小作物需水量，提高农作物用水安全，应根据气候变化做出相应的对策。

表 2 西辽河流域需水量与各气象要素之间的相关系数（r）

| 月份 | 最高温度(℃) | 最低温度(℃) | 平均相对湿度(%) | 平均风速 (m/s) | 日照时数 (h) |
|----|---------|---------|-----------|------------|----------|
| 5 | 0.095 | -0.080 | -0.347* | 0.326* | 0.251 |
| 6 | 0.341* | 0.115 | -0.376** | 0.340* | 0.406* |
| 7 | 0.384** | -0.055 | -0.484** | 0.249 | 0.566** |
| 8 | 0.396** | 0.029 | -0.353* | 0.172 | 0.287* |
| 9 | 0.043 | -0.120 | -0.363** | 0.475** | 0.204 |

*表示在 0.05 水平上显著相关；**表示在 0.01 水平上显著相关

3.2. 西辽河流域及其站点全生育期需水量时间变化特征

西辽河流域 50a 来需水量变化呈锯齿状(图 2), 这表明该地区需水量变化较为剧烈, 但整体上呈下降的趋势, 需水量范围在 284-654mm 之间, 最高值出现在 1963 年, 最低值出现在 2005 年。为了进一步研究各个站点的变化情况, 采用 Mann-Kendall 趋势分析法对西辽河流域及各站点全生育期的春玉米需水量时间变化趋势进行分析, 表 3 中可以看出, 除锡林浩特、

通辽、通榆 3 个站点需水量呈上升趋势外, 其余 20 个站点均呈现下降的趋势, 其上升、下降的趋势均未超过 0.05 显著性水平, 这说明研究区时间变化趋势不显著。宝国吐、白城、建平县和朝阳 4 个站点的 UF 绝对值均大于 0.88, 相对于其他站点而言, 需水量下降趋势较为明显。西辽河流域的 UF 值为-0.396, 呈现下降趋势, 这与图 3 的线性趋势分析结果一致, 总体而言 50a 间西辽河流域的需水量呈现整体下降的趋势。

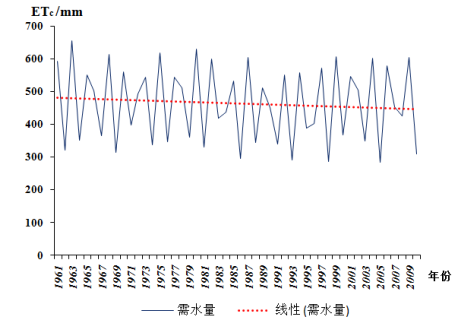


图 2 1961-2010 年西辽河流域需水量变化趋势

表 3 1961-2010 年西辽河流域及各站点需水量变化趋势 (M-K)

| 站点名称 | UF | 站点名称 | UF | 站点名称 | UF |
|-------|--------|-------|--------|------|--------|
| 彰武 | -0.257 | 多伦 | -0.495 | 宝国吐 | -0.882 |
| 长岭 | -0.092 | 动物珠穆沁 | -0.560 | 白城 | -0.884 |
| 赤峰 | -0.275 | 翁牛特旗 | -0.605 | 建平县 | -0.886 |
| 围场 | -0.280 | 阜新县 | -0.606 | 朝阳 | -0.909 |
| 开鲁 | -0.294 | 扎鲁特 | -0.610 | 锡林浩特 | 0.027 |
| 西乌珠穆沁 | -0.396 | 双辽 | -0.654 | 通辽 | 0.216 |
| 林西县 | -0.436 | 开原 | -0.662 | 通榆 | 0.292 |
| 巴林左旗 | -0.465 | 承德 | -0.694 | | |
| 西辽河流域 | -0.396 | | | | |

3.3. 西辽河流域春玉米需水量空间分析

对西辽河流域各生育期多年平均需水量进行空间插值, 可知西辽河流域需水量具有明显的空间差异性, 空间上呈中-中东部高值区向四周呈辐射状递减。从县域尺度来看, 整体呈现以科尔沁沙地为中心区域向东北、西南两侧减少的趋势。自西辽河流域西南方向围场-林西县-巴林左旗-翁牛特, 至东北方向巴林左旗-扎鲁特-开鲁-通辽-双辽, 随着地形地貌的影响, 研究区的海拔逐渐降低, 加之纬度、温度和降

水等条件的约束, 春玉米各生育期需水量呈现先升高再降低的规律, 5 月需水量最低, 其值范围在 21.13~28.07mm 之间, 之后随之增加, 7 月达到峰值, 其值范围在 142.33~178.99mm, 之后随之降低。开鲁县地处西辽河冲积平原西部, 该区域气温变化不大, 地势较为平坦, 海拔高度为 243m, 相对湿度较小, 该区域春玉米各生育期需水量均最高, 在需水量较高的季节和区域, 玉米存在较大的风险, 易造成粮食减产、绝产等较为严重的问题。

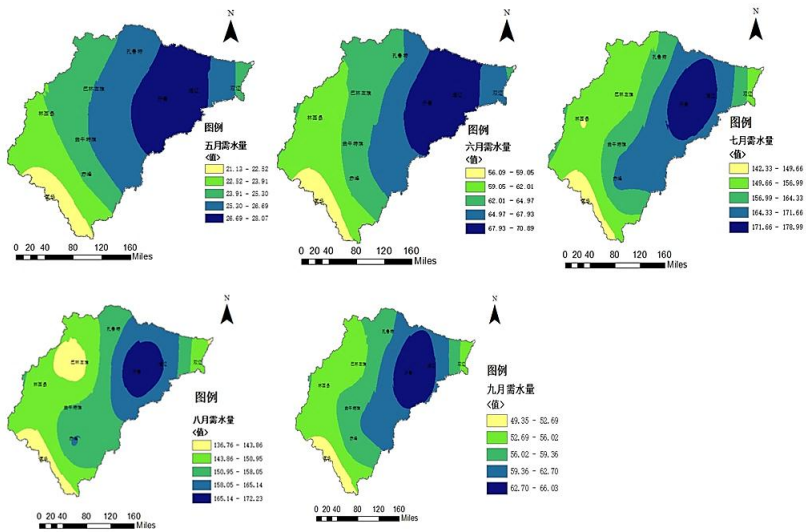


图3 西辽河流域生育期各月春玉米需水量空间分布图

4. 结论与讨论

4.1. 结论

本文选取 1961-2010 年西辽河流域 23 个站点气象数据进行需水量计算，并采用相关分析、Mann-Kendall 检验法和普通克里格空间插值法对研究区进行时空格局分析。结果表明：

(1) 西辽河流域需水量与最高温度、平均风速和日照时数呈正相关关系，各个生育期的需水量与气象要素之间的相关程度不同，7 月最高温度和日照时数与作物需水量的相关性均超过 99% 的显著性水平；平均相对湿度与需水量呈负相关关系，且在整个生育期内相关性均

4.2. 讨论

西辽河流域地处北方农牧交错带，随着全球气候变暖以及玉米播种面积不断增大的影响，该区域应重视和加强水资源保护和利用，尤以科尔沁沙地为代表。近 50a 来，西辽河流域全生育期需水量呈逐年下降的趋势，这是各个气象要素（温度、湿度、风速、日照时数等）的共同影响所致，因此仅考虑个别指标对其的影响具有一定局限性。本文分析了各气象要素与作物需水量的相关关系，客观的分析了 50a 间需水量的变化趋势，有效的减小了误差。作物需水量的研究可为区域水资源合理布局及水安全评价提供科学依据，对区域农业防御水旱灾害及其风险评价具有指导意义。

超过 95% 的显著性水平，其对需水量的影响程度最大。

(2) 50a 内西辽河流域春玉米全生育期需水量范围在 284-654mm 之间，逐年呈下降的趋势，除锡林浩特、通辽、通榆 3 个站点需水量呈上升趋势外，其余 20 个站点均呈现下降的趋势，但上升和下降都不显著。

(3) 西辽河流域春玉米需水量空间布局呈以科尔沁沙地为中心的中-中东部高值区向四周呈辐射状递减。自西南方向至东北方向，随着地形地貌和气象要素的影响，春玉米各生育期需水量均呈现先升高再降低的规律。

本文的研究结果与杨艳昭、杨剑等人的结果一致^[17,18]。因此，本文对西辽河流域春玉米需水量的时空分布特征的探究是科学可靠的，有利于该区域农业水资源的开发和利用，为合理调度水库以及发展节水灌溉的研究提供了科学依据与方法支持。本研究也存在不足之处，文中仅气象要素的角度分析作物需水量的时空格局，未考虑地形地貌特征、人类活动及其它社会因素对其的影响，有待进一步研究。

Acknowledgements

This study was supported by National Natural Science Foundation (41571491), the National Non-Profit Research Program of China

(No.201401015) and “Twelfth five-year” science and technology support project (2011BAD3 2B00-04).

致谢

本研究得到了国家自然科学基金项目(41571491)、水利部公益性行业科研专项经费项目(201401015)和国家“十二五”科技支撑项目(2011BAD32B04)”的支持。

参考文献

- [1]孙小舟, 封志明, 杨艳昭. 西辽河流域 1952 年-2007 年参考作物蒸散量的变化趋势. 资源科学, 2009, 31(3):479-484.
- [2] R. Zhang, H Zou, M. Hong, et al. Risk analysis of water resources crisis in the Lancang - Mekong River Drainage Basin under the background of climate change. Journal of Risk Analysis and Crisis Response, 2012, 2(3):209-213.
- [3] 黄仲冬, 齐学斌, 樊向阳,等. 降雨和蒸散对夏玉米灌溉需水量模型估算的影响. 农业工程学报, 2015, 31(5):85-92.
- [4] 庞艳梅, 陈超, 潘学标. 1961-2010 年四川盆地玉米有效降水和需水量的变化特征. 农业工程学报, 2015, 31(z1):133-141.
- [5]Conrad C, Rahmann M, Machwitz M. Satellite based calculation of spatially distributed crop water requirements for cotton and wheat cultivation in Fergana Valley, Uzbekistan. Global & Planetary Change, 2013, 110(4):88-98.
- [6]樊引琴. 作物蒸发蒸腾量的测定与作物需水量计算方法的研究[D]. 西安: 西北农林科技大学, 2001.
- [7] 高晓容, 王春乙, 张继权,等. 近 50 年东北玉米生育阶段需水量及早涝时空变化. 农业工程学报, 2012, 28(12):101-109.
- [8]Hao L, Zhang X, Gao J. simulating human-induced changes of water resources in the upper Ciliaohe river basin, China. Environmental Engineering & Management

Journal, 2011.

- [9]何俊仕, 边晓东, 付玉娟,等. 西辽河平原主要作物耗水量及耗水规律研究. 节水灌溉, 2012(11):1-4.
- [10]吴志勇, 陆桂华, 张建云,等. 西辽河流域潜在蒸散量时空格局. 地理科学进展, 2010, 29(9):1115-1120.
- [10] 胡志桥,田霄鸿,张久东,等. 石羊河流域主要作物的需水量及需水规律的研究. 干旱地区农业研究, 2011, 29(3):1-6.
- [11]刘光启. 农业速查速算手册[M]. 北京: 化学工业出版社, 2007:66.
- [12]Shadmani M, Marofi S, Roknian M. Trend Analysis in Reference Evapotranspiration Using Mann-Kendall and Spearman's Rho Tests in Arid Regions of Iran. Water Resources Management, 2012, 26(1): 211-224.
- [13]张涵丹, 卫伟, 薛蕙. 基于 R/S 分析和 Mann-Kendall 检验的定西市气温降水变化特征. 水土保持研究, 2015, 22(6):183-189.
- [14]雷璐, 孙春敏. Mann-Kendall 检验方法在增江径流趋势分析中的应用. 中国科技信息, 2012(19):39-39.
- [15]Stein A, Staritsky I G, Bouma J, et al. Simulation of moisture deficits and areal interpolation by universal cokriging.. Water Resources Research, 1991, 27(8): 1963-1973.
- [16]Bechini L, Ducco G, Donatelli M, et al. Modelling interpolation and stochastic simulation in space and time of global solar radiation. Agriculture Ecosystems & Environment, 2000, 81(1):29-42.
- [17]杨艳昭, 杨玲, 张伟科,等. 西辽河流域玉米水分平衡时空分布格局. 干旱区资源与环境, 2014, 28(4).
- [18]杨剑, 孙小舟. 西辽河流域春玉米需水量变化趋势. 华中师范大学学报:自然科学版, 2010, 44(4):691-695.