

建三江主要作物需水量变化趋势与关键影响因子识别

邢贞相^{1,2} 喻 熠¹ 李凤昱^{1,2} 王丽娟¹ 付 强^{1,2} 王红利¹

(1. 东北农业大学水利与土木工程学院, 哈尔滨 150030;

2. 东北农业大学农业农村部农业水资源高效利用重点实验室, 哈尔滨 150030)

摘要: 基于建三江垦区 1995—2018 年逐日气象数据,采用 Penman - Monteith 公式结合单作物系数法计算其主要作物水稻、玉米、大豆生育期的需水量,利用去趋势预置白(TFPW)的 Mann - Kendall(TFPW - MK)研究 3 种作物需水量变化特征,并通过重标极差(R/S)分析法预测作物未来需水量变化趋势;借助通径分析法研究 6 个气象因子与作物需水量的相关性,识别了作物需水量变化的关键影响因子,并分析了关键影响因子变化与作物需水量变化趋势间的关系。结果表明:建三江垦区主要作物水稻、玉米、大豆全生育期需水量存在显著差异,3 种作物多年平均需水量分别为 484.84、425.91、319.11 mm;影响水稻、玉米和大豆需水量的关键影响因子为平均气温、净辐射和日照时长,对作物需水量有明显增进作用;风速、相对湿度通过与其他因子协同作用对作物需水量有一定限制作用;在 1995—2018 年时间序列中,水稻和大豆的全生育期作物需水量呈上升趋势,玉米的全生育期需水量呈下降趋势;未来,水稻和大豆全生育期需水量呈上升趋势,玉米全生育期需水量呈降低趋势。研究可为该垦区作物灌溉水量分配和灌溉制度的制定提供决策依据。

关键词: 作物需水量; 建三江垦区; TFPW - MK 法; 通径分析法; R/S 分析法

中图分类号: S274.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2022)07-0308-08

OSID:



Change Trend and Key Influencing Factors Identification of Main Crops Water Demand in Jiansanjiang

XING Zhenxiang^{1,2} YU Yi¹ LI Fengyu^{1,2} WANG Lijuan¹ FU Qiang^{1,2} WANG Hongli¹

(1. School of Water Conservancy and Civil Engineering, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China

2. Key Laboratory of High Efficiency Use of Agricultural Water Resources, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China)

Abstract: Studying the trend of crop water demand and identifying key influencing factors can provide a basis for scientific crop irrigation, improvement of agricultural water use efficiency, and optimal allocation of water resources. Based on the daily meteorological data of Jiansanjiang Reclamation Area from 1995 to 2018, according to the Penman - Monteith formula combined with the single-crop coefficient method, the water requirement of the main crops of rice, corn, and soybeans during the growth period were calculated. Using the trend-free pre-whitening Mann - Kendall (TFPW - MK) method to study the change characteristics of the water demand of three crops, adopt the rescaled range (R/S) analysis method to predict the change trend of the future water demand of the crops, and the path analysis method was used to quantitatively analyze the influence of six meteorological factors such as average temperature, net radiation, sunshine hours, wind speed, precipitation, and relative humidity on crop water demand. The key influencing factors of water demand changes were determined, and the relationship between the change trend of key influencing factors and the change trend of water demand was analyzed. The results showed that the average multi-year water requirement of the reference crops in Jiansanjiang Reclamation Area was 606.68 mm. The inter-annual changes in the water requirement of major crops such as rice,

收稿日期: 2021 - 08 - 20 修回日期: 2021 - 09 - 24

基金项目: 国家自然科学基金项目(51979038、51825901、51909033)、国家重点研发计划项目(2017YFC0406004)、黑龙江省自然科学基金项目(E2015024)和黑龙江省水文图集修编项目(SWJFS-2018-009)

作者简介: 邢贞相(1976—),男,教授,博士生导师,主要从事水资源高效利用研究,E-mail: zxxing@neau.edu.cn

通信作者: 李凤昱(1992—),男,讲师,博士,主要从事水文学及水资源研究,E-mail: lify20@neau.edu.cn

corn and soybeans during the growth period were relatively stable. There was a significant difference between the amount of water. The average multi-year water requirement of the three crops were 484.84 mm, 425.91 mm and 319.11 mm, respectively. In the time series from 1995 to 2018, the water demand of rice and soybeans during the whole growth period showed an upward trend, while the water demand of maize during the whole growth period showed a downward trend. In the future, water demand during the whole growth period of rice and soybeans would increase, and water demand during the whole growth period of corn would decrease. Average temperature, radiation and sunshine hours were the key influencing factors for the water demand of rice, corn and soybeans, and they played a role in increasing the water demand. Precipitation increased the water demand of crops, but it was not obvious. Wind speed and relative humidity played a certain restrictive effect on the water demand of the three crops. Therefore, the water demand of rice, corn and soybeans in Jiansanjiang Reclamation Area was affected by many influencing factors. The change trend of water demand caused by the changes of meteorological factors during the whole growth period of rice and soybean was consistent with the change trend of water demand of rice and soybean in the TFPW – MK test analysis. The increase in the average temperature during the whole growth period of corn was not enough to offset the influence of radiation and the reduction of sunshine hours on the water requirement of corn, so the water requirement of corn showed a downward trend, which was consistent with the change trend of water requirement of corn in the TFPW – MK test analysis.

Key words: crop water demand; Jiansanjiang Reclamation Area; TFPW – MK method; path analysis method; R/S analysis method

0 引言

我国是一个水资源严重短缺的国家,有限的水资源严重制约了经济和社会发 展,水资源供需矛盾突出仍是可持续发展的主要瓶颈^[1-3]。农业是水资源消耗最大的行业,作为农业大国,我国 70% 以上水资源用于农业,且农业用水量中有 90% 以上用于农业灌溉^[4-5]。提高农业用水效率是节约用水的关键,而分析和揭示作物需水量的变化特征可为提高农业用水效率提供科技支撑。此外,气象条件是作物需水量的影响因素,因此,探讨作物需水量的变化特征离不开气象条件的影响分析,识别作物需水量变化的关键气象因子,为作物需水量的计算和分析提供重要的协变量。

近年来,作物需水量在不同地区的分布特征及其对不同区域气候变化响应是研究的热点^[6-8]。JIA 等^[9]采用 Penman – Monteith 结合单作物系数法及水平衡模型分析了气候变化下冬小麦需水量的变化及其决定因素。LI 等^[10]基于 TFPW 的 Mann – Kendall 趋势检验分析了陕北黄土高原主要气象参数的时空演变过程和特征,发现参考作物蒸散发量(ET₀)对相对湿度敏感性最高和日最高气温对潜在蒸散量贡献率最高。尹海霞等^[4]通过相关分析法和 R/S 分析法得出相对湿度、日照时长和平均风速是作物需水量的主要影响因子以及未来一段时间作物需水量与过去基本一致。刘小刚等^[11]基于时间序列分析法和通径分析法对河南省主粮作物需水量变化趋势与成因进行分析。

建三江垦区有 15 个大中型国有现代化农场,是我国重要的粮食储备基地和商品粮生产基地^[12]。近年来随着大面积开垦以及旱田改为水田面积大量增加,致使农业用水量也大幅度增加,一度出现了水资源利用效率低下及水资源短缺等问题,实现农业水资源的高效利用和优化配置已经成为本区域现代化农业的研究重点。目前,关于建三江垦区作物需水量变化趋势及影响因子已有相关研究^[13-14],但大多采用传统的趋势分析法、相关分析法等对作物需水量的变化成因进行分析,难以定量分析各因子的影响程度及因子之间的相互影响,同时对未来作物需水量的变化趋势研究较少。本研究基于长时间序列(1995—2018 年)逐日气象资料,采用 Penman – Monteith 模型结合单作物系数法,对建三江垦区种植面积大且种植结构稳定的 3 种主要作物(水稻、玉米和大豆)生长季内(5—9 月)的日作物需水量进行估算,利用 TFPW – MK 法分析 3 种主要作物需水量的趋势性变化,并通过 R/S 分析法预测作物需水量未来变化趋势,借助通径分析法研究 3 种主要作物需水量的变化成因,探讨建三江垦区主要作物需水量变化特征以及未来趋势预测,为建三江垦区科学灌溉和水资源高效利用提供参考依据。

1 数据与方法

1.1 研究区域概况

建三江垦区(图 1)位于三江平原腹地,系黑龙江、松花江、乌苏里江汇流的河间地带,与同江、富锦、抚远、饶河三市一县相邻,坐标为东经 132°31′26″~

134°22′26″, 北纬 46°49′47″~48°12′58″。建三江垦区总面积 $1.24 \times 10^4 \text{ km}^2$, 占黑龙江垦区总面积的 22%, 其中耕地面积 $7.9 \times 10^3 \text{ km}^2$, 沼泽湿地面积 $2.7 \times 10^3 \text{ km}^2$ 。建三江垦区属寒温带湿润季风气候区, 夏季高温多雨, 冬季寒冷干燥, 全年温差大, 年平均气温为 $1 \sim 2^\circ\text{C}$, 年内平均气温大于 10°C 的活动积温为 $2\,267 \sim 2\,415^\circ\text{C}$ ^[15], 日照时长为 $2\,260 \sim 2\,449 \text{ h}$, 平均降水量为 $550 \sim 600 \text{ mm}$, 且降水年内分布不均, 多集中在 6—9 月, 无霜期为 $110 \sim 135 \text{ d}$ 。建三江垦区地势平坦、土质肥沃, 土壤有机质含量较高, 主要土壤为棕壤、白浆土、黑土、草甸土、沼泽土等。该区域的热量、日照时长、雨量、土质是水稻、玉米、大豆及其他经济作物的最佳生长区带的重要天然条件。

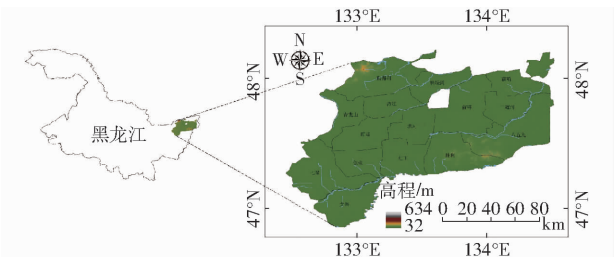


图 1 研究区域示意图

Fig. 1 Schematic of study area

1.2 数据来源

所用日平均近地面(2 m)气压、近地面(2 m)气温、近地面(10 m)全风速、近地面(2 m)空气比湿、地面降水率等气象要素来自从国家青藏高原科学数据中心下载的中国区域地面气象要素数据集^[16], 其

时间分辨率为 3 h、空间分辨率为 0.1° 。日照时长数据来自《黑龙江省农垦总局农业局气象资料》。

1.3 研究方法

1.3.1 Penman – Monteith 公式

采用联合国粮食及农业组织 (FAO) 推荐的 Penman – Monteith 公式结合单作物系数法计算逐日作物需水量^[17–18], 其表达式为

$$ET_0 = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} U_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34U_2)}$$

(1)

- 式中
- ET_0 ——逐日参考作物蒸散发量, mm/d

Δ ——饱和水汽压与温度关系曲线的斜率

R_n ——冠层表面净辐射, $\text{MJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$

G ——土壤热通量, $\text{MJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$

γ ——湿度计常数

T ——空气的平均温度, $^\circ\text{C}$

U_2 ——地面以上 2 m 处的风速, m/s

e_s ——空气饱和水汽压, kPa

e_a ——空气实际水汽压, kPa

单作物需水量表达式为

$$ET_c = K_c ET_0$$

(2)

- 式中
- ET_c ——逐日某单一作物需水量, mm/d

K_c ——单作物的作物系数

建三江垦区主要作物生育期的划分及各作物的作物系数(K_c)是根据 FAO 提供的资料并结合前人研究基础^[14, 19–21]和建三江垦区气象条件得出, 见表 1~3。

表 1 水稻生育期及作物系数

Tab. 1 Growth period and crop coefficient of rice

生育期	插秧期	返青期	分蘖初期	分蘖盛期	分蘖末期	拔节孕穗期	抽穗开花期	乳熟期	黄熟期
日期	5 月 20— 29 日	5 月 30 日— 6 月 5 日	6 月 6— 21 日	6 月 22 日— 7 月 1 日	7 月 2— 11 日	7 月 12 日— 8 月 1 日	8 月 2— 14 日	8 月 15 日— 9 月 13 日	9 月 14— 28 日
K_c	1. 1	1. 2	1. 2	1. 2	1. 3	1. 3	1. 1	1. 1	1. 0

注: 生育期及作物系数源自文献[14]。下同。

表 2 玉米生育期及作物系数

Tab. 2 Growth period and crop coefficient of maize

生育期	播种期	出苗期	七叶期	拔节期	抽雄期	吐丝期	乳熟期	成熟期
日期	4 月 20 日— 5 月 19 日	5 月 20— 31 日	6 月 1— 30 日	7 月 1— 20 日	7 月 21— 31 日	8 月 1— 20 日	8 月 21 日— 9 月 5 日	9 月 6— 30 日
K_c	0. 41	0. 58	0. 80	1. 16	1. 16	1. 10	1. 10	0. 83

表 3 大豆生育期及作物系数

Tab. 3 Growth period and crop coefficient of soybean

生育期	播种期	出苗期	三叶期	分支期	开花期	结荚期	鼓粒期	成熟期
日期	5 月 10— 29 日	5 月 30 日— 6 月 8 日	6 月 9— 28 日	6 月 29 日— 7 月 8 日	7 月 9— 28 日	7 月 29 日— 8 月 27 日	8 月 28 日— 9 月 25 日	9 月 26 日— 10 月 5 日
K_c	0. 32	0. 32	0. 60	0. 62	0. 75	0. 96	0. 71	0. 32

1.3.2 TFPW - MK 趋势性检验法

TFPW - MK 是一种改进的 Mann - Kendall 趋势检验方法。通过 TFPW 方法,剔除原始数据序列中显性趋势对自相关系数估计的影响,可更加准确地对数据序列进行 Mann - Kendall 趋势检验。该方法通过统计值 Z 来判别序列的整体变化趋势和 Sen 斜率值来估算序列的变化量,当 $Z > 0$ 时,序列整体呈上升趋势;当 $Z < 0$ 时,序列整体呈下降趋势。TFPW - MK 方法的计算过程见文献[22 - 24]。本文中采用 TFPW - MK 趋势性检验法对建三江垦区 1995—2018 年时间序列内水稻、玉米、大豆需水量在生育期不同阶段的趋势性变化进行分析,并通过气象因子在时间序列中各作物生育期内的变化量对水稻、玉米、大豆需水量变化趋势进行验证。

1.3.3 R/S 分析法

R/S 分析法是一种时间序列统计方法,用来处理时间序列的分形结构,分析时间序列的分形特征和长期记忆过程,可以反映出时间序列的可持续性。对于某时间序列 $\{x(t)\}, t = 1, 2, \dots, n$, 当任意正整数 $\tau \geq 1$ 时,计算均值序列,累计离差序列,极差 $R(\tau)$ 序列和标准极差 $S(\tau)$ 序列。对于 $R(\tau)/S(\tau) = R/S$, 如果存在 $R/S \propto \tau^H$ 关系(该关系中的 H 称为 H 指数),说明时间序列 $\{x(t)\}$ 存在 Hurst 现象^[25]。根据分析得出的 H (Hurst) 指数来判断这种趋势是随机的还是存在一定趋势的。其具体计算方法见文献[26]。对于不同的 H 指数($0 < H < 1$) 存在对应关系:①当 $H = 0.5$ 时,表明时间序列是独立随机变化的,即下一阶段的变化趋势与过去阶段的变化趋势无关。②当 $0.5 < H < 1$ 时,表明序列变化趋势具有持续性,即下一阶段变化趋势与过去阶段的变化趋势相同,且当 H 越接近于 1,其持续性越强。③当 $0 < H < 0.5$ 时,表明序列变化具有反持续性,即下一阶段变化趋势与过去阶段变化趋势相反,且当 H 越接近于 0,其反持续性越强。

1.3.4 通径分析法

通径分析法是探究多个自变量 $x_1, x_2, \dots, x_n$ 和因变量间线性关系的一种重要统计方法^[27-30]。根据通径分析,获得自变量对因变量影响的直接作用和自变量通过其他自变量对因变量的间接作用,克服了相关分析和多元回归分析的不足,具有直观、精确等优点^[11]。本文利用通径分析法量化分析建三江垦区气象因子对水稻、玉米和大豆需水量的影响。

通径分析法中多个自变量 $x_i (i = 1, 2, \dots, n)$ 与因变量 y 的线性回归方程为

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + \dots + b_nx_n \tag{3}$$

式中 b_n ——非标准化系数

线性回归方程经过数学变换可建立正规矩阵

$$\begin{bmatrix} 1 & r_{12} & \cdots & r_{1n} \\ r_{21} & 1 & \cdots & r_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ r_{n1} & r_{n2} & \cdots & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ \vdots \\ b_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_{1y} \\ r_{2y} \\ \vdots \\ r_{ny} \end{bmatrix} \tag{4}$$

式中 $r_{ij} (i = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, n)$ 为 x_i 和 x_j 的相关系数; $b_i (i = 1, 2, \dots, n)$ 为直接通径系数,即自变量 x_i 对因变量 y 的直接作用; $r_{ij}b_j$ 为间接通径系数,即自变量 x_i 通过自变量 x_j 对因变量 y 的间接作用; r_{iy} 为自变量 x_i 通过其他自变量对因变量 y 的总间接影响效应。

决策系数计算式为

$$R^2_{(i)} = b_i^2 + 2 \sum_{j \neq i} b_i r_{ij} b_j \tag{5}$$

式中 $R^2_{(i)}$ 为决策系数,反映了 x_i 对 y 的综合决定作用,不仅包含 x_i 对 y 的直接决定作用,也包含 x_i 通过相关路径对 y 的间接决定作用。将 $R^2_{(i)}$ 的绝对值从大到小排序,这个顺序反映了 x_i 对 y 的综合作用顺序。综合作用最大者对应的 x_i 对 y 的直接作用可能不大,但它对 y 的综合作用大,所以可把它称为主要决定因素,若 $R^2_{(i)} > 0$,表明 x_i 对 y 起增进作用,若 $R^2_{(i)} < 0$,表明 x_i 对 y 起限制作用。

回归方程估测的可靠程度 E 为

$$E = r_{1y}b_1 + r_{2y}b_2 + \dots + r_{ny}b_n \tag{6}$$

剩余项通径系数为 $P_{ye} = \sqrt{1 - E}$,如果 P_{ye} 较大,则说明存在对因变量有较大影响的因子未被考虑。

本文利用该方法分析建三江垦区主要气象因子对作物需水量的影响,并识别 3 种主要作物需水量的关键影响因子。

2 结果与分析

2.1 作物需水量计算与分析

采用 Penman - Monteith 公式结合单作物系数法,依据式(1)、(2)计算的建三江垦区 1995—2018 年的参考作物蒸散发量及水稻、玉米、大豆的全生育期作物需水量,结果如图 2 所示。从图 2a 可以看出,建三江垦区参考作物年蒸散发量变化范围为 549.86 ~ 670.60 mm,多年平均年蒸散发量为 606.68 mm。年蒸散发量明显高于多年平均年蒸散发量的年份有 1998、2001、2007、2008、2017、2018 年,年蒸散发量分别为 670.60、640.77、663.53、650.28、649.63、636.12 mm。年蒸散发量明显低于多年平均年蒸散发量的年份有 2000、2010、2011、2012、2013 年,年蒸散发量分别为 563.57、576.77、575.25、549.86、566.63 mm。

从图 2b 可以看出,水稻、玉米、大豆全生育期需

水量的年际变化不明显,同年 3 种作物需水量之间存在显著差异。根据图 2b 对应的 1995—2018 年同种作物需水量不难得出其多年平均全生育期的需水量,其中水稻需水量最大,多年平均需水量为 484.84 mm;玉米需水量次之,多年平均需水量为 425.91 mm,为水稻多年平均需水量的 88%;大豆需水量最小,多年平均需水量为 319.11 mm,为水稻多年平均需水量的 66%。

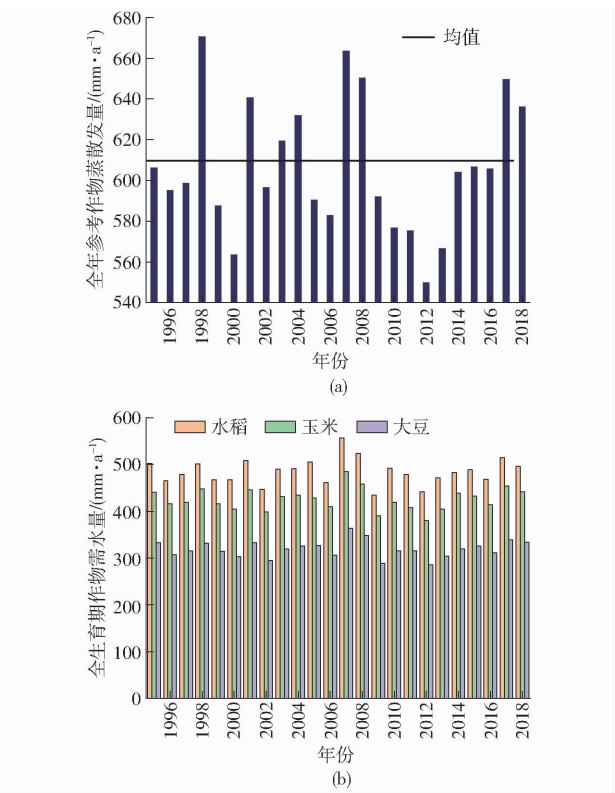


图 2 建三江垦区 1995—2018 年作物需水量年际变化
Fig. 2 Inter-annual variations of crop water demand in Jiansanjiang Reclamation Area from 1995 to 2018

根据式(2)计算得到的逐日需水量可求出各生育期的需水量,结果如图 3 所示。从图 3 可以看出,水稻、玉米、大豆 3 种作物在生育期内需水量均呈现先增加后减少的趋势;在水稻各生育期中,分蘖期(分蘖初期、分蘖盛期、分蘖末期)需水量达到最大值,总计为 164.31 mm,其次为拔节孕穗期和乳熟期,需水量分别为 94.01 mm 和 84.88 mm,其他阶段需水量相对较少;日需水量最大值出现在 7 月 11 日(分蘖末期),为 5.26 mm。在玉米生育期各阶段中,七叶期需水量达到最大值,为 88.57 mm,其次为拔节期和吐丝期,需水量分别为 86.99、67.68 mm。其他阶段需水量相对较少,日需水量最大值出现在 7 月 15 日(拔节期),为 4.79 mm。在大豆生育期各阶段中,结荚期需水量达到最大值,为 95.15 mm,其次为三叶期、开花期和鼓粒期,需水量分别为 49.34、58.72、49.04 mm。其他阶段需水量相对较

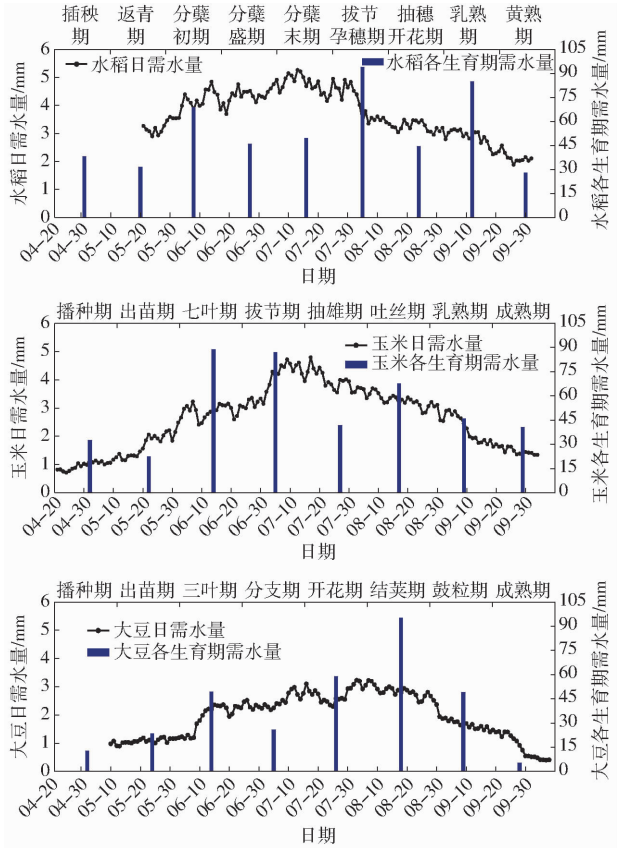


图 3 不同生育期多年平均作物需水量及日需水量
Fig. 3 Annual average and daily water demand of crops in different growth periods

少,日需水量最大值出现在 8 月 2 日(开花期),为 3.19 mm。

2.2 作物需水量趋势性分析

采用 TFPW - MK 法计算 1995—2018 年水稻、玉米和大豆生育期需水量的 Z 统计值(图 4),由图 4 可知,水稻在插秧期、返青期、分蘖末期、抽穗开花期、乳熟期和全生育期对应的 Z 值分别为 1.02、1.41、0.47、0.72、0.02、0.22,故其需水量呈增加趋势;在分蘖初期、分蘖盛期、拔节孕穗期和黄熟期对应的 Z 值分别为 -0.72、-0.42、-0.47、-0.17,故其需水量呈减少趋势。同理,可以分析出:玉米在出苗期、抽雄期、吐丝期和乳熟期需水量呈增加趋势;在播种期、七叶期、拔节期、成熟期和全生育期需水量呈减少趋势。大豆在播种期、出苗期、分支期、结荚期和全生育期的需水量呈增加趋势;三叶期、开花期、鼓粒期和成熟期的需水量呈减少趋势。

2.3 作物需水量趋势预测

利用 1.3.3 节的方法对主要作物不同生育期的需水量进行 R/S 预测分析,得到的 Hurst 指数(H)见表 4~6。从表 4 可看出,水稻需水量的 Hurst 指数在返青期、分蘖初期、分蘖末期、拔节孕穗期、抽穗开花期和乳熟期均小于 0.5,表明未来水稻这 6 个

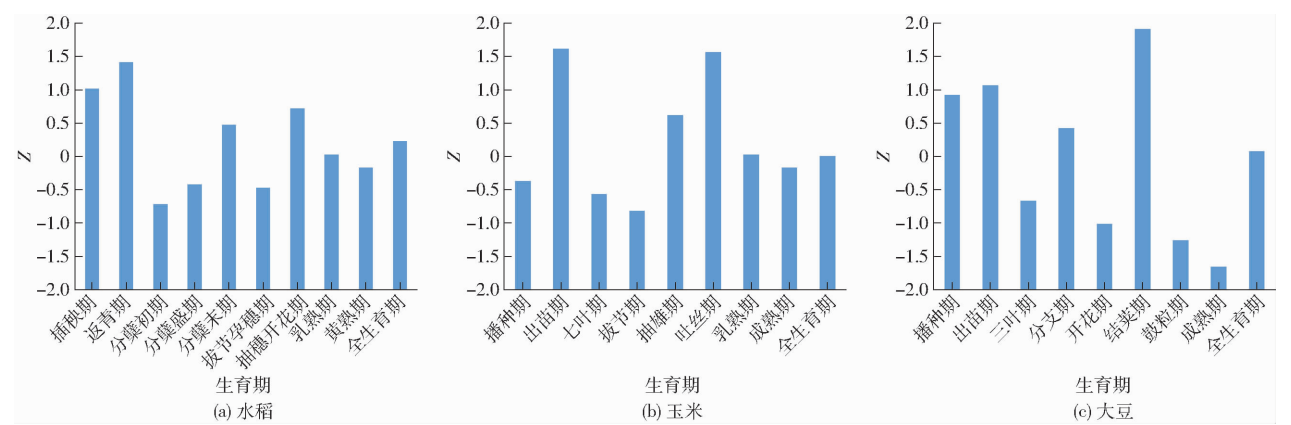


图 4 水稻、玉米、大豆生育期 Z 统计值

Fig.4 Z-statistic values of growth period of rice, maize and soybean

表 4 水稻不同生育期 R/S 分析的 Hurst 指数

生育期	插秧期	返青期	分蘖初期	分蘖盛期	分蘖末期	拔节孕穗期	抽穗开花期	乳熟期	黄熟期	全生育期
Hurst 指数	0.66	0.22	0.48	0.78	0.37	0.25	0.35	0.34	0.74	0.51

表 5 玉米不同生育期 R/S 分析的 Hurst 指数

生育期	播种期	出苗期	七叶期	拔节期	抽雄期	吐丝期	乳熟期	成熟期	全生育期
Hurst 指数	0.59	0.84	0.62	0.62	0.50	0.64	0.38	0.66	0.73

表 6 大豆不同生育期 R/S 分析的 Hurst 指数

生育期	播种期	出苗期	三叶期	分支期	开花期	结荚期	鼓粒期	成熟期	全生育期
Hurst 指数	0.44	0.63	0.52	0.82	0.32	0.64	0.58	0.78	0.58

生育阶段的需水量变化呈与现阶段(2.2 节的变化趋势)相反的变化趋势,在插秧期、分蘖盛期和黄熟期需水量的 H 大于 0.5,表明这 3 个生育阶段的未来水稻需水量变化呈与过去一致的变化趋势,即未来水稻需水量在插秧期、分蘖初期、拔节孕穗和全生育期呈增加趋势;在返青期、分蘖盛期、分蘖末期、抽穗开花期、乳熟期和黄熟期呈减少趋势。同理,未来玉米需水量在出苗期和吐丝期呈增加趋势;在播种期、七叶期、拔节期、乳熟期、成熟期和全生育期呈减少趋势;在抽雄期存在随机性。未来大豆需水量在出苗期、分支期、开花期、结荚期和全生育期呈增加趋势;播种期、三叶期、鼓粒期、成熟期呈减少趋势。

2.4 作物需水量主要影响因子分析

为揭示气象因素对作物需水量的影响机制,采用通径分析法研究平均气温、净辐射、日照时长、风速、降水量和相对湿度等气象因子对作物需水量的影响程度,并识别其关键影响因子。经过正态检验,作物需水量满足正态分布,可进行通径分析^[31]。依据式(6)计算 6 个气象因子在水稻、玉米、大豆全生育期需水量的通径分析中得到的回归方程估测可靠程度 E 分别为 0.923、0.951、0.941,剩余项通径系

数分别为 0.277、0.221、0.243,都很小。依据通径分析的原理,可以认为这 6 个因子已考虑了作物需水量全部影响较大的气象因子,故选取这 6 个因子作为上述 3 种作物需水量关键因子分析的备选集,开展关键影响因子的识别研究。

表 7 为通径分析法得出的各气象影响因子的通径系数。从表 7 可知,平均气温、净辐射、日照时长、风速、降水量、相对湿度对水稻需水量的直接通径系数分别为 0.571、0.878、0.427、0.102、-0.060、-0.147。其中,净辐射对水稻需水量的直接通径系数在各影响因子中最大;平均气温、日照时长对水稻需水量的直接通径系数相对较大;而风速、降水量、相对湿度 3 个因子对水稻需水量的直接通径系数相对很小;这说明风速、降水量、相对湿度对水稻需水量的直接影响不明显。平均气温通过净辐射对水稻需水量的贡献最大(间接通径系数 0.632);净辐射通过平均气温对水稻需水量的贡献最大(间接通径系数 0.411),表明平均气温与净辐射相互作用对水稻需水量影响程度最大;日照时长通过净辐射对水稻需水量的贡献最大(间接通径系数 0.378),净辐射通过日照时长对水稻需水量的贡献(间接通径系

表 7 水稻、玉米、大豆需水量的通径分析

Tab.7 Path analysis of water demand of rice, maize and soybean

作物	影响因子	决策系数	直接通径	间接通径系数						
			系数	平均气温	净辐射	日照时长	风速	降水量	相对湿度	合计
水稻	平均气温	0.949	0.571		0.632	0.107	-0.040	-0.033	-0.120	0.546
	净辐射	1.789	0.878	0.411		0.184	-0.022	-0.002	0.009	0.580
	日照时长	0.682	0.427	0.143	0.378		0.002	0.016	0.046	0.585
	风速	-0.041	0.102	-0.194	-0.191	0.010		0.021	0.102	-0.252
	降水量	0.001	-0.060	0.240	0.036	-0.114	-0.045		-0.094	0.023
	相对湿度	-0.009	-0.147	0.399	-0.056	-0.132	-0.071	-0.036		0.177
玉米	平均气温	0.871	0.593		0.553	0.046	-0.086	0.002	-0.077	0.438
	净辐射	1.670	0.912	0.359		0.108	0.008	0.000	0.001	0.476
	日照时长	0.379	0.355	0.077	0.277		-0.015	-0.001	0.019	0.357
	风速	-0.057	0.136	-0.373	0.051	-0.039		-0.002	0.084	-0.279
	降水量	0.028	0.004	0.272	0.079	-0.196	-0.053		-0.066	0.036
	相对湿度	-0.041	-0.108	0.422	-0.012	-0.061	-0.106	0.002		0.245
大豆	平均气温	1.373	0.633		0.818	0.027	-0.054	0.045	-0.068	0.768
	净辐射	2.508	1.102	0.470		0.130	-0.022	0.011	-0.002	0.587
	日照时长	0.574	0.411	0.041	0.459		-0.004	-0.030	0.027	0.493
	风速	-0.089	0.139	-0.246	-0.174	-0.012		-0.033	0.076	-0.389
	降水量	0.029	0.103	0.280	0.122	-0.201	-0.045		-0.066	0.090
	相对湿度	-0.058	-0.110	0.450	-0.014	-0.071	-0.108	0.063		0.320

数 0.184) 也较大,表明日照时长与净辐射相互作用对水稻需水量影响也很大;另外,日照时长通过平均气温对水稻需水量的贡献(间接通径系数 0.143)、平均气温通过日照时长对水稻需水量的贡献(间接通径系数 0.107)均较大,表明日照时长与平均气温相互作用对水稻需水量的影响也较明显。综合以上分析,平均气温、净辐射、日照时长 3 个气象因子对水稻需水量的影响显著。风速通过平均气温对水稻需水量的抑制作用最大(间接通径系数 -0.194);降水量通过平均气温对水稻需水量的贡献最大(间接通径系数 0.240),通过日照时长对水稻需水量的抑制作用最大(间接通径系数 -0.144);相对湿度通过平均气温对水稻需水量的贡献最大(间接通径系数 0.399),通过日照时长对水稻需水量抑制作用最大(间接通径系数 -0.132)。从决策系数可知净辐射、平均气温、日照时长决策系数绝对值均很大,为水稻需水量关键影响因子且对水稻需水量起增进作用,降水量对水稻需水量起增进作用但不明显,风速和相对湿度对水稻需水量起一定限制作用。

同理,净辐射、平均气温、日照时长为玉米需水量关键影响因子且对大豆需水量起增进作用,降水

量对玉米需水量起增进作用但不明显,风速和相对湿度对玉米需水量起一定限制作用;净辐射、平均气温、日照时长为大豆需水量关键影响因子且对大豆需水量起增进作用,降水量对大豆需水量起增进作用但不明显,风速和相对湿度对大豆需水量起一定限制作用。

从通径分析结果可知,平均气温、净辐射、日照时长是影响建三江垦区作物需水量的关键影响因子,并与风速、降水量、相对湿度共同作用于建三江垦区主要作物需水量,因此建三江垦区水稻、玉米和大豆的需水量受各影响因子共同作用。

利用 TFPW - MK 法计算 1995—2018 年作物全生育期内气象因子的 Sen 斜率结果如表 8 所示。由表 8 可知,建三江垦区水稻全生育期平均气温、净辐射、日照时长的增加和降水量的减少会导致水稻生育期需水量的增加;玉米生育期净辐射和日照时长的明显减少和降水量的显著增加会导致玉米生育期需水量的减少;大豆生育期平均气温、净辐射、日照时长的增加会导致大豆生育期需水量的增加。气象因子在全生育期内的变化趋势所导致作物需水量的变化与前文作物需水量趋势分析结论一致。

表 8 1995—2018 年全生育期内各气象因子年变化量

Tab.8 Annual changes of various meteorological factors during whole growth period from 1995 to 2018

作物	平均气温/($^{\circ}\text{C}\cdot\text{a}^{-1}$)	净辐射/($\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$)	日照时长/($\text{h}\cdot\text{a}^{-1}$)	风速/($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{a}^{-1}$)	降水量/($\text{mm}\cdot\text{a}^{-1}$)	相对湿度/($\%\cdot\text{a}^{-1}$)
水稻	0.032	0.413	0.488	-0.011	-0.500	0.120
玉米	0.041	-0.508	-1.525	-0.003	2.055	0.098
大豆	0.039	0.283	1.594	-0.001	0.011	0.083

3 结论

(1)建三江垦区参考作物年蒸散发量变化范围为 549.86 ~ 670.60 mm,多年平均年蒸散发量为 606.68 mm;主要作物水稻、玉米、大豆的生育期需水量存在显著差异,作物需水量分别为 484.84、425.91、319.11 mm。

(2)水稻在插秧期、返青期、分蘖末期、抽穗开花期、乳熟期和全生育期的需水量年际间均呈增加趋势;而在分蘖初期、分蘖盛期、拔节孕穗期和黄熟期的需水量年际间均呈下降趋势。玉米在出苗期、抽雄期、吐丝期和乳熟期的需水量年际间均呈增加趋势;而在播种期、七叶期、拔节期、成熟期和全生育期需水量年际间均呈下降趋势。大豆在播种期、出苗期、分支期、结荚期和全生育期的需水量年际间均

呈增加趋势;三叶期、开花期、鼓粒期和成熟期的需水量年际间均呈下降趋势。

(3)未来水稻需水量在返青期、分蘖初期、分蘖末期、拔节孕穗期、抽穗开花期和乳熟期的年际变化趋势与过去相反,其余生育期需水量变化趋势与过去保持一致。玉米需水量在乳熟期与过去趋势相反;在抽雄期存在随机性,其余生育期需水量与过去保持一致。大豆在播种期和开花期与过去趋势相反,其余生育期与过去保持一致。

(4)从通径分析结果可知,平均气温、净辐射、日照时长是影响建三江垦区作物需水量的关键影响因子,对需水量有增进作用,降水量对需水量有增进作用但不明显,风速、相对湿度的协同作用对需水量增加有一定限制作用,且生育期内气象因子变化趋势与主要作物需水量变化趋势一致。

参 考 文 献

[1] 张帆,任冲锋,蔡宴朋,等.基于复合多目标方法的灌区水资源优化配置[J].农业机械学报,2021,52(11):297-304.
ZHANG Fan, REN Chongfeng, CAI Yanpeng, et al. Optimal allocation of water resources in irrigation area based on compound multi-objective method[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(11): 297-304. (in Chinese)

[2] ZOU Minzhong, KANG Shaozhong, NIU Jun, et al. A new technique to estimate regional irrigation water demand and driving factor effects using an improved SWAT model with LMDI factor decomposition in an arid basin[J]. Journal of Cleaner Production, 2018, 185(4): 814-828.

[3] KANG S, HAO X, DU T, et al. Improving agricultural water productivity to ensure food security in China under changing environment: from research to practice[J]. Agricultural Water Management, 2017, 579: 5-17.

[4] 尹海霞,张勃,王亚敏,等.黑河流域中游地区近 43 年来农作物需水量的变化趋势分析[J].资源科学,2012,34(3):409-417.
YIN Haixia, ZHANG Bo, WANG Yamin, et al. Analysis of the changing trend of crop water demand in the middle reaches of the Heihe River Basin in the past 43 years[J]. Resource Science, 2012, 34(3): 409-417. (in Chinese)

[5] 高志永,冯峰,杨毅.三义寨灌区主要作物需水量变化趋势分析[J].西北农业学报,2017,26(3):477-486.
GAO Zhiyong, FENG Feng, YANG Yi. Analysis on the change trend of main crops' water demand in Sanyizhai Irrigation District[J]. Acta Agriculturae Boreali-Occidentalis Sinica, 2017, 26(3): 477-486. (in Chinese)

[6] 李萍,魏晓妹.变化环境下农业需水量演变趋势及驱动力[J].排灌机械工程学报,2013,31(9):822-828.
LI Ping, WEI Xiaomei. Evolution trend and driving force of agricultural water demand under changing environment[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2013, 31(9): 822-828. (in Chinese)

[7] 刘玉春,姜红安,李存东,等.河北省棉花灌溉需水量与灌溉需求指数分析[J].农业工程学报,2013,29(19):98-104.
LIU Yuchun, JIANG Hongan, LI Cundong, et al. Analysis of cotton irrigation water demand and irrigation demand index in Hebei Province[J]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(19): 98-104. (in Chinese)

[8] 王子龙,刘莹,姜秋香,等.黑龙江省参考作物蒸散量变化及气象因子分析[J].水利水运工程学报,2021(2):46-56.
WANG Zilong, LIU Ying, JIANG Qiuxiang, et al. Analysis of reference crop evapotranspiration changes and meteorological factors in Heilongjiang Province[J]. Hydro-Science and Engineering, 2021(2): 46-56. (in Chinese)

[9] JIA K, YANG Y, DONG G, et al. Variation and determining factor of winter wheat water requirements under climate change[J]. Agricultural Water Management, 2021, 254: 106967.

[10] LI C, WU P, LI X, et al. Spatial and temporal evolution of climatic factors and its impacts on potential evapotranspiration in Loess Plateau of Northern Shaanxi, China[J]. Science of the Total Environment, 2017, 589: 165-172.

[11] 刘小刚,符娜,李闯,等.河南省主粮作物需水量变化趋势与成因分析[J].农业机械学报,2015,46(9):188-197.
LIU Xiaogang, FU Na, LI Chuang, et al. Analysis on the trends and causes of water requirements of staple food crops in Henan Province[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(9): 188-197. (in Chinese)

[12] 徐磊.区域农业水资源系统恢复力特征及其对农业种植结构影响效应研究[D].哈尔滨:东北农业大学,2019.
XU Lei. Research on the characteristics of resilience of regional agricultural water resources system and its effect on agricultural planting structure[D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2019. (in Chinese)

[13] 杨丽妍.不同气候变化情景下的区域水资源分析及旱田灌溉制度优化[D].哈尔滨:东北农业大学,2020.
YANG Liyan. Regional water resources analysis and dryland irrigation system optimization under different climate change scenarios[D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2020. (in Chinese)

[14] 修琳,李宏亮,张玉虎,等.2000—2015 年三江平原主要作物需水量特征及影响因素分析[J].干旱区地理,2019,42(4):854-866.
XIU Lin, LI Hongliang, ZHANG Yuhu, et al. Analysis of the characteristics and influencing factors of water requirements of main crops in the Sanjiang Plain from 2000 to 2015[J]. Arid Land Geography, 2019, 42(4): 854-866. (in Chinese)

[15] 黑龙江省农垦总局建三江分局农田水利建设规划[R].黑龙江省农垦勘测设计研究院,2010.

- [34] 陈能,肖宏彬,李珍玉,等.应力路径对根-土复合体抗剪强度的影响[J].公路工程,2015,40(3):19-24,56.
CHEN Neng, XIAO Hongbin, LI Zhenyu, et al. The effects of stress path on the shear strength of soil-root composite[J]. Highway Engineering, 2015, 40(3): 19-24, 56. (in Chinese)
- [35] 万利,王震洪,杨成波.生态修复区不同植物群体的根系固土力学机理[J].农业工程学报,2009,25(10):278-283.
WAN Li, WANG Zhenhong, YANG Chengbo. Mechanical mechanism of soil-reinforcement for different plant communities in ecological restoration region[J]. Transactions of the CSAE, 2009, 25(10): 278-283. (in Chinese)
- [36] 尤泳.退化羊草草地机械化破土切根改良技术优化研究[D].北京:中国农业大学,2011.
YOU Yong. Mechanical remediation technology of degraded (*Leymus-chinensis*) by soil-gashing and root-cutting[D]. Beijing: China Agricultural University, 2011. (in Chinese)
- [37] LI Lin, SHAO Wei, LI Yadong, et al. Effects of climatic factors on mechanical properties of cement and fiber reinforced clays [J]. Geotechnical and Geological Engineering, 2015, 33(3): 537-548.
- [38] PRAVEEN K, SHALENDRA P S. Fiber-reinforced fly ash subbases in rural roads[J]. Journal of Transportation Engineering, 2008, 134(4): 171-180.
- [39] GRZYBFADDOUL A M. Numerical analysis of the reinforcement of existing foundations by the soil mixing technique[D]. Lyon:Institut National des Sciences Appliquees (INSA), 2014.
- [40] 郝建斌,魏兴梅,姚婕,等.麦秸秆加筋土的强度特性及细观结构分析[J].同济大学学报(自然科学版),2019,47(6):764-768,831.
HAO Jianbin, WEI Xingmei, YAO Jie, et al. Strength characteristics and mesostructure of wheat straw reinforced soil[J]. Journal of Tongji University(Natural Science), 2019, 47(6): 764-768, 831. (in Chinese)
- [41] 李建兴,何丙辉,湛芸,等.不同护坡草本植物的根系分布特征及其对土壤抗剪强度的影响[J].农业工程学报,2013,29(10):144-152.
LI Jianxing, HE Binghui, CHEN Yun, et al. Root distribution features of typical herb plants for slope protection and their effects on soil shear strength[J]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(10): 144-152. (in Chinese)
- [42] 李国荣,胡夏嵩,毛小青,等.青藏高原东北部黄土区灌木植物根系护坡效应的数值模拟[J].岩石力学与工程学报,2010,29(9):1877-1884.
LI Guorong, HU Xiasong, MAO Xiaoqing, et al. Numerical simulation of shrub roots for slope protection effects on loess area of Northeast Qinghai-Tibetan Plateau[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(9): 1877-1884. (in Chinese)

(上接第315页)

- [16] YANG K, JIE H, TANG W, et al. On downward shortwave and longwave radiations over high altitude regions: observation and modeling in the Tibetan Plateau[J]. Agricultural & Forest Meteorology, 2010, 150(1): 38-46.
- [17] 谢娟,栗晓玲.基于LMDI的灌溉需水量变化影响因素分解[J].农业工程学报,2017,33(7):123-131.
XIE Juan, SU Xiaoling. Decomposition of factors affecting changes in irrigation water demand based on LMDI [J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(7): 123-131. (in Chinese)
- [18] 马亚强.柴达木盆地生态需水量研究[D].西安:长安大学,2019.
MA Yaqiang. Research on ecological water demand in Qaidam Basin[D]. Xi'an: Chang'an University, 2019. (in Chinese)
- [19] ALLEN R G, PEREIRA L S, RAES D, et al. Crop evapotranspiration—guidelines for computing crop water requirements—FAO irrigation and drainage paper 56[J]. FAO, Rome, 1998,300(9):D05109.
- [20] 孙爱华,朱士江,张忠学.三江平原水稻水分生态效益试验研究[J].灌溉排水学报,2010,29(3):109-111.
SUN Aihua, ZHU Shijiang, ZHANG Zhongxue. Experimental study on water ecological benefit of rice in Sanjiang Plain[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2010, 29(3): 109-111. (in Chinese)
- [21] 聂堂哲,张忠学,齐智娟,等.1960—2015年黑龙江省水稻需水量时空分布特征[J].农业机械学报,2019,50(5):279-290.
NIE Tangzhe, ZHANG Zhongxue, QI Zhijuan, et al. Spatio-temporal distribution characteristics of rice water demand in Heilongjiang Province from 1960 to 2015[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(5): 279-290. (in Chinese)
- [22] 章诞武,丛振涛,倪广恒.基于中国气象资料的趋势检验方法对比分析[J].水科学进展,2013,24(4):490-496.
ZHANG Danwu, CONG Zhentao, NI Guangheng. Comparative analysis of trend test methods based on Chinese meteorological data[J]. Advances in Water Science, 2013, 24(4): 490-496. (in Chinese)
- [23] TALAEE P H, SABZIPARVAR A A, TABARI H. Observed changes in relative humidity and dew point temperature in coastal regions of Iran[J]. Theoretical & Applied Climatology, 2012, 110(3): 385-393.
- [24] GOCIC M, TRAJKOVIC S. Analysis of changes in meteorological variables using Mann-Kendall and Sen's slope estimator statistical tests in Serbia[J]. Global & Planetary Change, 2013, 100: 172-182.
- [25] 王孝礼,胡宝清,夏军.水文时序趋势与变异点的R/S分析法[J].武汉大学学报(工学版),2002,35(2):10-12.
WANG Xiaoli, HU Baoqing, XIA Jun. R/S analysis method of hydrological time series trends and variation points[J]. Journal of Wuhan University (Engineering Edition), 2002, 35(2): 10-12. (in Chinese)
- [26] ZHAO X, CHEN X, HUANG Q. Trend and long-range correlation characteristics analysis of runoff in upper Fenhe River basin [J]. Water Resources, 2017, 44(1): 31-42.
- [27] WRIGHT S. The method of path coefficients[J]. Annals of Mathematical Statistics, 1934, 5(3): 161-215.
- [28] BHAAT G M. Significance of path coefficient analysis in determining the nature of character association[J]. Euphytica, 1973, 22(2): 338-343.
- [29] 袁志发,周静苹,郭满才,等.决策系数——通径分析中的决策指标[J].西北农林科技大学学报(自然科学版),2001,29(5):131-133.
YUAN Zhifa, ZHOU Jingyu, GUO Mancai, et al. Decision coefficient—the decision index in path analysis[J]. Journal of Northwest A&F University (Natural Science Edition), 2001, 29(5): 131-133. (in Chinese)
- [30] DEWEY D R, LU K H. A correlation and path-coefficient analysis of components of crested wheatgrass seed production[J]. Problemy Tuberkuljeza, 1959, 51(9): 70-74.
- [31] 杜家菊,陈志伟.使用SPSS线性回归实现通径分析的方法[J].生物学通报,2010,45(2):4-6.