

基于作物水分盈亏指数的昆明水稻生长季 干旱特征及成因分析

李 闯, 刘艳伟, 符 娜, 杨启良, 刘小刚

(昆明理工大学现代农业工程学院, 云南 昆明 650500)

摘 要: 基于昆明站点 1952—2013 年逐日气象观测资料, 根据联合国粮农组织 1998 年推荐的 Penman - Monteith 公式计算了昆明站近 62 a 来逐日的参考作物蒸腾量、水稻生育期需水量, 利用 Mann - Kendall 趋势检验法研究作物需水量变化规律, 同时根据水稻的水分亏缺指数 (CWDI), 采用通径分析方法研究各气象因子对水分亏缺指数的影响。结果表明: 近 62 年来昆明地区平均旬需水量为 32.55 mm; 水稻生长季内干旱分布明显不均匀, 随着生长季的推进, 干旱级别从轻旱到重旱, 干旱发生最严重时期是黄熟生育阶段, 在整个水稻生长季内, 水稻水分盈亏指数均值为 38.07%, 表明水稻处于重旱状态; 在水稻生育期变异系数研究中, 水分盈亏指数变异系数均较小, 在返青、分蘖、拔节、抽穗、乳熟和黄熟六个阶段中, 变异系数分别为 1.8%、1.9%、1.3%、1.1%、0.8% 和 0.8%, 表明昆明地区近年干旱等级变化较小; 影响水分盈亏指数最大正相关因素为日照, 最大负相关因素为水汽压。

关键词: 作物水分亏缺指数; 水稻; 作物需水量; 干旱特征; 通径分析

中图分类号: S165+.22; S511 **文献标志码:** A

Cause analysis and drought characteristics during rice growing season in Kunming based on crop water deficit index

LI Chuang, LIU Yan-wei, FU Na, YANG Qi-liang, LIU Xiao-gang

(Faculty of Modern Agricultural Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming, Yunnan 650500, China)

Abstract: Based on the daily meteorological observed data from 1952 to 2013 in the Kunming Station, the daily reference evapotranspiration (ET_0) and the rice water requirements in growing season during 62 years in Kunming Station has been calculated by the Penman - Monteith Formular recommended by the Food and Agriculture Organization (FAO) in 1998. Using the Mann - Kendall trend test method has researched the change regular of the crop water requirements. At the same time, the concept of crop water deficit index (CWDI) has been introduced. According to the water deficit index of rice, has researched the effects of each meteorological factor to the water deficit index by using the path analysis method. The results showed that: In recent 62 years, the average ten days crop water requirements in Kunming Region was 32.55 mm. The drought distribution in rice growth season was obviously uneven. With the increase of the growth season, the drought grade was from light drought level to the heavy drought level, the most serious drought occurrence period was the ripening stages. In whole rice growing season, the average water deficit index was 38.07%, it indicated that rice was at the heavy drought status. In the research of the coefficient of variation, the variation coefficient of the water deficite index was total small. In the six growth stages as turning green, tillering, jointing, heading, milk maturity and yellow maturity, the variation coefficients were 1.8%, 1.9%, 1.3%, 1.1%, 0.8% and 0.8%, respectively. It indicated that change of the drought grade was rather small in recent years in Kunming Region. The maximal positive correlation factor for affecting the water deficit index was the sunshine hours and the negative correlation factor was the water vapor pressure.

Keywords: crop water deficit index; rice; crop water requirements; drought characteristic; path analysis

收稿日期: 2015-06-05

基金项目: 国家自然科学基金面上项目“亏缺灌溉时小桐子对盐胁迫环境的响应与水氮高效利用机制研究”(51379004); 云南省应用基础研究计划项目(KKSY201223076); 昆明理工大学大学生创新训练计划项目“模拟降雨下红壤坡面水土保持效应研究”(201410674253)

作者简介: 李 闯(1992—), 男, 江苏沭阳人, 硕士, 研究方向为水土保持及生态恢复。E-mail: 250539531@qq.com。

通信作者: 刘艳伟(1981—), 女(蒙古族), 内蒙古通辽人, 副教授, 硕士生导师, 主要从事生态水文学及水土保持方面的教学和研究。E-mail: liu - xiaocao@sohu.com。

当前气候变化是国际社会普遍关注的热点,它与水资源危机和干旱灾害密切相关^[1]。干旱灾害是云南省各项自然灾害之首,出现的频率最高、持续时间最长、影响范围最大^[2]。自有气象记录以来,昆明干旱灾情日益严峻,尤其是自2009年以来,由于降雨持续偏少,发生了4年连旱的极端气候。水稻作为昆明地区主要粮食作物之一,由于历年旱灾制约,水稻产量下降。水稻是耗水量最多的粮食作物之一,全国平均年耗水量达 $2\,550.1 \times 10^7 \text{ m}^3$,占到粮食作物总耗水量的51.06%,其中每生产1 000 kg水稻,平均年耗水量为 $1\,177 \text{ m}^3$ ^[3-5],研究昆明水稻生长季干旱特征及其成因,为当地水资源管理和农业相关部门提供参考依据。

目前对于我国干旱的研究主要集中在北方地区,而对西南地区的干旱研究相对较少,已有的研究区域多以整个西南地区为界。针对不同区域的干旱变化特征成因分析已有许多成果^[6-8]。刘雪梅等^[9]应用旱夏强度指数和修正的帕尔默指数等指标,研究了贵州地区干旱类型、发生频率、地区分布特征,对贵州地区的干旱主要特征进行了分区;王明田等^[10]用相对湿润指数方法研究西南地区季节性干旱分布特征,结果表明西南地区近10 a干旱强度明显增强,且干旱范围扩大;詹存等^[11]对四川丘陵地区的干旱时空分布及成因做了研究,认为四川丘陵地区季节性干旱具有持续性,降水集中程度和日照时数对川中丘陵区的影响最严重;McKee^[12]提出的标准化降水指数(SPI)指出,降水是影响旱涝的主要因素之一,并采用 Γ 函数的标准化降水累积频率分布来划分干旱等级。

在干旱指标研究方面,由于不同的部门或学科对干旱的定义不同,所以出现了不同的干旱评判指标^[13]。在农业干旱等级中,对干旱指标进行了划分:作物水分亏缺指数(CWDI)、标准化降水指数(SPI)、降水距平百分率、帕尔默干旱指数(PDSI)、土壤相对湿度(R_{sm})、综合干旱指数(Id)。由于作物水分亏缺指数(CWDI)能够较好地反映植物、土壤和气象三者的综合影响,所以比较真实地反映了作物水分亏缺状况。本研究以昆明为研究区,选取昆明气象站1952—2013年的长序列日气象资料,计算作物水分盈亏指数,分析昆明地区水稻生长季干旱变化特征,并在此基础上使用通径分析法研究其干旱变化成因,以期对该区水稻科学种植提供理论和实践参考。

1 材料与研究方法

1.1 研究区概况

昆明地处云贵高原中部($E102^{\circ}10' \sim 103^{\circ}40'$, $N24^{\circ}22'N \sim 26^{\circ}3'$),地形复杂,地势北高南低,属低纬度高原山地季风气候,主要的气候特征是干湿分明、雨热同季,冬旱、春夏、初夏旱明显,同时夏季高温不足,降水不均匀,导致季节性干旱。年均气温 14.9°C ,年降水量 $1\,011.2 \text{ mm}$,雨季(5—10月)降水量 882.8 mm ,占全年降水量的87.3%;年蒸发量 $1\,838.3 \text{ mm}$,相对湿度为74%;全年无霜期在240 d以上;年日照数 $2\,196.7 \text{ h}$,日照百分率56%。粮食作物以水稻和小麦为主,影响本地水稻生长的主要气象灾害是干旱和低温冷害。

1.2 研究方法

1.2.1 作物水分亏缺指数 本研究采用作物水分亏缺指数(CWDI)计算昆明中稻生长季干旱指数,计算公式如下:

$$CWDI = a \times CWDI_i + b \times CWDI_{i-1} + c \times CWDI_{i-2} + d \times CWDI_{i-3} + e \times CWDI_{i-4} \quad (1)$$

式中,CWDI为水稻生育期按旬时段计算的累计水分亏缺指数,分别计算5月下旬—9月上旬共11旬水分亏缺指数,由于作物干旱主要体现为累计效应,水分亏缺指数一般计算连续5旬的作物亏缺指数; $CWDI_i$ 、 $CWDI_{i-1}$ 、 $CWDI_{i-2}$ 、 $CWDI_{i-3}$ 、 $CWDI_{i-4}$ 为该旬及前4旬水分亏缺指数; a 、 b 、 c 、 d 、 e 为对应旬的权重系数, a 取值为0.3; b 取值为0.25; c 取值为0.2; d 取值为0.15; e 取值为0.1^[14]。

考虑到水分满足时期,对式(1)计算水分亏缺指数做了如下改进,为

$$CWDI_i = \begin{cases} \frac{ET_c - P_i}{ET_c} \times 100\% & ET_c \geq P_i \\ 0 & ET_c \leq P_i \text{ 且 } P_i \leq 50 \\ K_i \times 100\% & P_i > 50 \end{cases} \quad (2)$$

式中, $CWDI_i$ 为第*i*旬水稻水分亏缺指数; ET_c 为水稻需水量(mm); P_i 为第*i*旬降水量(mm); K_i 为降水量远大于水稻需水量时的水分盈余指数; K_i 值根据三个不同的降水量情况下取值不同:当水稻需水量(ET_c)大于降水量(P_i),水稻发生水分亏缺;当水稻需水量(ET_c)小于降水量(P_i)时,且降水量不大时($P_i < 50 \text{ mm}$)视为水稻水分不亏缺,即 $CWDI_i = 0$;降水量(P_i)远大于水稻需水量(昆明地区水稻平均旬需水量约为50 mm)时考虑有效降水的水分盈余,这里分3个量级计算盈余的不同效应。即

$$K_i = \begin{cases} \frac{\overline{ET}_i - P_i}{\overline{ET}_i} \times 100\% & 50 < P_i \leq 100 \\ -\frac{P_i}{2\overline{ET}_i} & 50 < P_i \leq 100 \\ -1.5 & P_i > 150 \end{cases} \quad (3)$$

式中, \overline{ET}_i 为水稻旬作物需水量基数, 在昆明一般取 50 mm; 当降水量在 50 ~ 100 时, 即旬降水量大于 \overline{ET}_i 且小于 2 倍 \overline{ET}_i 时, 盈余效果好; 当降水量在 100 ~ 150 mm 时, 即旬降水量大于 2 倍 \overline{ET}_i 时, 盈余能力减弱 (仅为降水量在 50 ~ 100 mm 时的一半); 降水量大于 150 mm 时, 即旬降水大于 3 倍 \overline{ET}_i 时, 多余降水基本成为径流流失, 水分盈余稳定, $K_i = -1.5$ 。

式(2)中, ET_c 由参考作物蒸散量 (ET_0) 与水稻的作物系数 (K_c) 相乘得到, 即

$$ET_c = k_c \cdot ET_0 \quad (4)$$

式中, ET_0 为参考作物蒸腾量 ($\text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$); 用 FAO(1998) 推荐的 Penman - Monteith^[15-16] 公式计算:

$$ET_0 = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} U_2(e_a - e_d)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34U_2)} \quad (5)$$

式中, Δ 为饱和水汽压与温度关系曲线在 T 处的切线斜率 ($\text{kPa} \cdot \text{C}^{-1}$); R_n 为冠层表面净辐射 ($\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$); G 为土壤热通量 ($\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$); γ 为干湿计常数 ($\text{kPa} \cdot \text{C}^{-1}$); T 为平均温度 (C); U_2 为 2 m 高处的平均风速 ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$); e_a 为实际水汽压 (kPa); e_d 为饱和水汽压 (kPa)。其中 Δ 、 R_n 、 G 、 U_2 可以通过气象台站观测资料计算获得。作物系数 K_c 参考中国的相关研究成果^[17], 并结合昆明地区水稻生育期为 5 月下旬至 9 月上旬的具体情况, 确定研究区水稻生育期内 5—9 月作物系数多年平均值分别为 1.3、1.5、1.7、1.8、1.5。本研究结合式(4)和式(5), 根据逐日气象资料计算西南地区水稻各生育期逐日需水量, 再依据逐日需水量数据计算出水稻每旬的需水量, 并统计全生育期需水量。

1.2.2 水稻干旱指标分级 根据农业干旱指标分级^[18], 在 5 月下旬至 9 月上旬, 水稻干旱等级即水稻返青 ~ 黄熟期前后分级标准为, $CWDI \leq 15\%$ 为无旱, $15\% < CWDI \leq 25\%$ 为轻旱, $25\% < CWDI \leq 35\%$ 为中旱, $35\% < CWDI \leq 50\%$ 为重旱, $CWDI > 50\%$ 为特旱。

1.2.3 变异系数 标准差与平均值的比值称为变

异系数, 当需要比较两组数据离散程度大小的时候, 如果两组数据的测量尺度相差太大或者数据量纲不同, 直接使用标准差来进行比较不合适, 此时就应当使用变异系数 (标准差与其平均值的比值) 来消除测量尺度和量纲的影响。变差系数 C_v ^[19] 的计算公式如下:

$$S = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - x')^2} \quad (6)$$

$$C_v = \frac{S}{x'} \quad (7)$$

式中, S 为均方差, x_i 为 i 站的某要素值, x' 为该要素的区域平均值。变差系数越大, 说明地区间该要素的差异越大, 离散程度越不稳定; 变差系数越小, 说明研究区域该要素的地区间差异越小, 离散程度越稳定^[20]。本文主要利用变异系数分析昆明地区水稻生育期各阶段水分盈亏指数之间的差异, 得出研究区域水稻生育期水分盈亏指数变化特征。

1.2.4 Mann - Kendall 趋势检验法 Mann - Kendall 非参数秩次相关检验法, 是由世界气象组织 (WMO) 推荐并使用的统计检验方法, 其优点是不需要样本遵从一定的分布, 也不受少数异常值的干扰^[21]。本研究利用 Mann - Kendall 检验法对昆明地区水稻水分盈亏指数年际变化趋势进行分析, 具体检验方法如下, 对于具有 n 个样本量的时间序列 $X = (x_1, x_2, \dots, x_n)$, 构造一秩序列 s_k ^[22]。

$$s_k = \sum_{i=1}^k r_i, \quad k = 2, 3, \dots, n \quad (8)$$

$$r_i = \begin{cases} +1, & \text{当 } x_i > x_j, \\ 0, & \text{当 } x_i \leq x_j, \end{cases} \quad j = 1, 2, \dots, i \quad (9)$$

式中, 秩序列 s_k 为第 i 时刻数值大于 j 时刻数值个数的累计数。

在时间序列随机独立的假定下, 趋势检验统计量为

$$U_k = \frac{[s_k - E(s_k)]}{\sqrt{\text{var}(s_k)}}, \quad k = 1, 2, \dots, n \quad (10)$$

$$E(s_k) = \frac{n(n+1)}{4} \quad (11)$$

$$\text{var}(s_k) = \frac{n(n-1)(2n+5)}{72} \quad (12)$$

式中, $U_1 = 0$, $E(s_k)$ 和 $\text{var}(s_k)$ 是累计数 s_k 的均值和方差, n 为序列长度, 当 $n > 10$ 时, U_k 收敛于标准正态分布。

分别按时间序列 x 顺序 x_1, x_2, \dots, x_n 和时间序列 x 逆序 x_n, x_{n-1}, \dots, x_1 计算出趋势检验统计量序列 UF_k 和 UB_k 。原假设为该序列无趋势, 若 UF_k 或 UB_k 的值大于 0, 则表明序列呈上升趋势, 小于 0 则表明

呈下降趋势。同时,给定显著性水平 α ,查正态分布表取临界值,若 UF_k 或 UB_k 大于临界值时,表明上升或下降趋势显著,超过临界值的范围确定为出现突变的时间区域;反之,变化趋势不显著。

1.2.5 通径分析 通径分析(path analysis)的实质是标准化的多元线性回归分析^[23],用于分析多个自变量和因变量之间的线性关系,找出自变量对因变量影响的直接效应和间接效应^[24],能够克服简单相关分析与回归分析的不足,全面反映自变量对因变量的作用效应^[25]。本文采用通径分析来量化研究各气象因子对作物需水量的影响程度。

对于一个相互关联的系统,若有 n 个自变量 $x_i (i = 1, 2, \dots, n)$ 和 1 个因变量 y 之间存在线性关系,回归方程为:

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + \dots + b_nx_n \quad (13)$$

根据各自变量间的简单相关系数 $r_{x_ix_j} (i \leq n, j \leq n)$ 和各自变量与因变量间的简单相关系数 $r_{x_iy} (i \leq n)$,由式(9)通过数学变换,可建立正规矩阵方程为:

$$\begin{bmatrix} 1 & r_{x_1x_2} & \dots & r_{x_1x_n} \\ r_{x_2x_1} & 1 & \dots & r_{x_2x_n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ r_{x_nx_1} & r_{x_nx_2} & \dots & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_{yx_1} \\ P_{yx_2} \\ \vdots \\ P_{yx_n} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_{x_1y} \\ r_{x_2y} \\ \vdots \\ r_{x_ny} \end{bmatrix} \quad (14)$$

解方程(10)即可求出通径系数 P_{ye}, P_{ye} 表示自

变量 x_i 对因变量 y 的直接通径系数,为 x_i 对因变量 y 的直接作用效应; $r_{x_ix_j}P_{yx_j}$ 表示自变量 x_i 通过 x_j 对因变量 y 的间接通径系数,为 x_i 通过 x_j 对因变量 y 的间接作用效应。剩余项的通径系数 P_{ye} 表示为:

$$P_{ye} = \sqrt{1 - (r_{x_1y}P_{yx_1} + r_{x_2y}P_{yx_2} + \dots + r_{x_ny}P_{yx_n})} \quad (15)$$

如果剩余项的通径系数 P_{ye} 较小,说明已找出主要因素;如果 P_{ye} 数值较大,则表明还有更重要的因素未被考虑在内。

1.3 数据来源及数据处理

本研究采用的昆明气象站点 1952—2013 年逐日的地面气象观测资料,由中国国家气象局提供,采用 Microsoft Excel 软件完成数据预处理,根据 FAO56 标准 Penman - Monteith 公式和作物系数计算逐日的参考作物蒸发蒸腾量及水稻需水量,从而得出作物水分亏缺指数;分析参考作物蒸发蒸腾量及水稻生育期需水量的年际变化趋势;同时借助 MATLAB7.0 软件编程对该站点水稻需水量和部分气象因子的年际变化进行 Mann - Kendall 趋势检验,分析该地区水稻逐年需水量及干旱的变化趋势与突变情况。

2 结果与分析

2.1 水稻生长季内水分供需情况基本特征

本研究按旬计算了水稻全生育期需水量 (ET_c)、降水量 (P_i) 和水分亏缺指数 ($CWDI$),得出该区多年水稻生育期均值,具体见图 1。

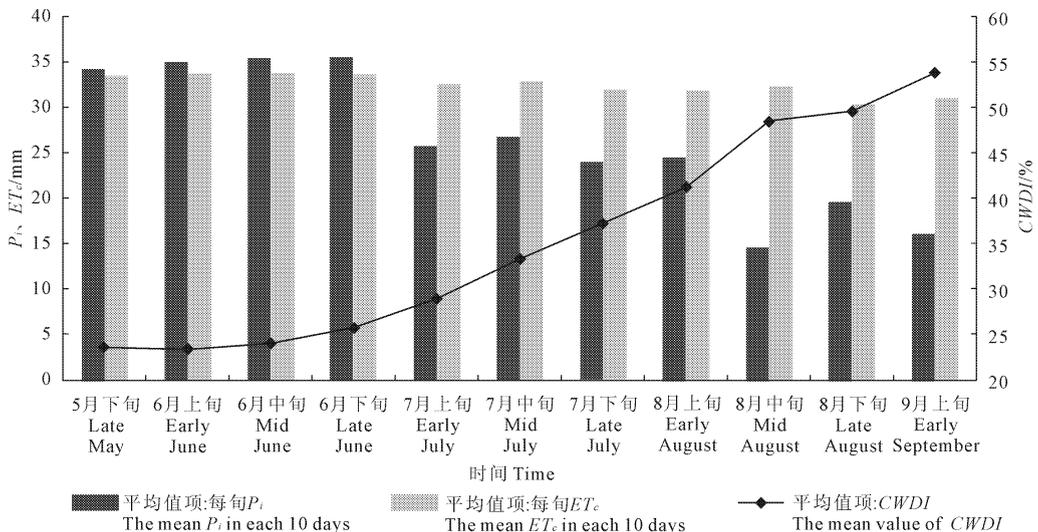


图 1 昆明水稻生育期需水量、降水量、水分亏缺指数变化趋势

Fig.1 The change trend of the water requirements, precipitation, and water deficit index in rice growth period in Kunming

昆明水稻生育期大部分处于雨季,在整个生育期内,旬降水量平均值为 26.51 mm,旬 $CWDI$ 平均值 35.38%,旬需水量为 32.55 mm。自进入雨季后,

降水逐渐增加,在 6 月中旬达到峰值,7 月上旬后降水量呈波动减少趋势,自 8 月上旬开始,降水量急剧减少。在此时期内,水稻需水量较为平稳,波动不

大。在水稻生育期内水分亏缺指数 *CWDI* 持续增加,在9月上旬达到峰值,数值达到 53.79%,为重旱级别。在7月中旬后,水稻生长处于重旱阶段。这说明在水稻生长后期阶段,由于降水不足,水稻需水量持续不变,作物生长长期处于干旱时期。

2.2 各生育期水分亏缺指数变化特征

水稻生育期划分为返青、分蘖、拔节、抽穗、乳熟和黄熟六个阶段。按水稻生育期分别计算昆明地区水稻各生育阶段水分盈亏指数(表 1)。昆明地区水稻各生育期中水分盈亏指数 *CWDI* 最大值均接近于 100%,此时的生育期旱级别为重旱,水分亏缺指数 *CWDI* 最小值全部为负值,此时的水稻生育期干

旱级别为无旱。通过对比相同生育期水分亏缺指数 *CWDI* 可以发现昆明地区的干旱分布极不平均,这是因为昆明地区气候为季节性干旱气候,降水时间分布不均匀,全年降雨分为旱季、雨季两季,在雨季中可能出现连续暴雨现象,如 1986 年 6 月 7 日,12 小时累计雨量达到 150.8 mm;同时在雨季中出现重度干旱情况,如 2012 年 6 月的持续性干旱,对农作物生长造成严重影响。通过水稻 *CWDI* 平均值可以看出:在整个水稻生育期内其值逐渐增大,这说明水稻生长季内是处于干旱状态,在水稻生育期关键的返青时期处于中旱。

表 1 昆明站点水稻不同生育期水分盈亏指数变化

Table 1 Change of water deficit index in rice different growth period in Kunming Station

生育阶段 Growth stages	<i>CWDI</i>					变异系数/% Coefficient of variation
	最大值/% Maximum	最小值/% Minimum	标准差 Standard deviation	平均值 Average	方差 Variance	
返青 Turning green(05-27~06-04)	100.0	-65.9	45.2	25.0	2046.3	1.8
分蘖 Tillering(06-05~07-09)	99.0	-101.2	49.2	25.8	2424.2	1.9
拔节 Jointing(07-10~07-26)	100.0	-85.3	47.5	35.4	2259.8	1.3
抽穗 Heading(07-27~08-08)	98.7	-65.9	44.4	41.6	1971.4	1.1
乳熟 Milky maturity(08-09~08-21)	99.5	-45.6	39.4	48.5	1554.3	0.8
黄熟 Yellow maturity(08-22~09-03)	99.8	-90.8	39.6	52.1	1570.1	0.8

分析研究区各个生育期的变异系数,各生育期水分盈亏指数的变异系数值总体很小,这表明,昆明地区水稻生育期内水分盈亏指数离差较小,变化较为稳定,不同生育期内的水分盈亏指数差异很小。

2.3 昆明地区水稻水分盈亏指数的年际变化规律

利用 Mann-Kendall 趋势检验法对昆明地区水稻水分盈亏指数 *CWDI* 进行趋势分析及突变分析,给定显著性水平 $\alpha = 0.05$,那么临界值 $u_{0.05} = \pm 1.96$,具体变化曲线见图 2。统计昆明 1952—2013 年水稻水分盈亏指数均值在 16.8%~65.1%之间,均大于 15%,即表明该区近 62 年水稻生长季均有旱情出现;由 Mann-Kendall 检验结果的 UF 曲线得出,1965—1967 年、1972—1978 年、1998—2008 年及 1957 与 1986 年 UF 统计量小于 0,表明此时间区间内昆明地区水稻生长季水分盈亏指数呈下降趋势,即干旱灾情有所减轻;其它年间 UF 统计量均大于 0,表明该区水稻生长季水分盈亏指数大多数时期呈上升趋势,即干旱等级持续增长;图中 UF 统计量和 UB 统计量的曲线在 2009 年出现交点,并且交点在临界线之间,表明为突变点,从而得出昆明近年来持续性重度旱灾是自 2009 年开始的突变现象,这与近几年昆明地区干旱情况较为吻合。

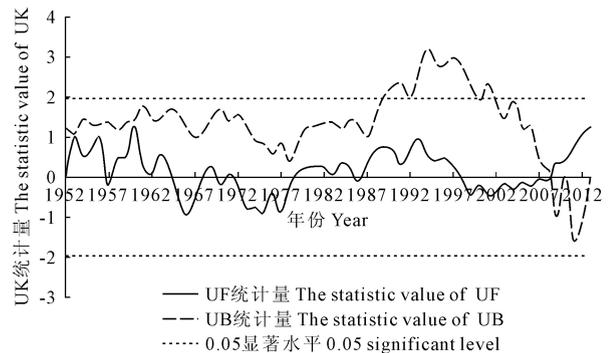


图 2 昆明地区水稻水分盈亏指数的 M-K 检验曲线

Fig. 2 The Mann-Kendall test curve of rice crop water deficit index in Kunming Region

2.4 气象因子对水分盈亏指数的通径分析

在通径分析中,计算了 9 个气象因子:降水量、气压、风速、气温、水汽、温度、日照、最低气温、最高气温对水分盈亏指数 *CWDI* 的通径系数 P ,表中 P 为降水量, PR 为气压, SW 为风速, TL 为日最低气温, S 为日照时数, TA 为气温, ME 为水汽压, HR 为相对湿度, TH 为日最高气温。根据通径分析原理,求出各个气象因子对水分盈亏指数 *CWDI* 的正则方程组,得出结果后计算各气象因子对 *CWDI* 的直接

作用(通径系数)和间接作用,直接通径系数见表 2, $CWDI$ 的总贡献,结果见表 3。最后分析各气象因子对回归方程估测可靠程度

表 2 气象因子对作物水分盈亏指数的直接通径系数

Table 2 Direct path coefficient of the meteorological factors to crop water deficit index

气象因子 Meteorological factors	P /mm	PR /kPa	SW /($m \cdot s^{-1}$)	TA /°C	ME /kPa	HR /%	S /h	TL /°C	TH /°C	$CWDI$ /%
P 值	-0.33	-0.02	0.14	-0.11	-0.67	-0.07	-0.10	0.03	0.29	1.00

表 3 气象因子对作物水分盈亏指数的通径分析结果

Table 3 The path analysis results for meteorological factors to crop water deficit index

气象因子 Meteorological factors	P /mm	PR /kPa	SW /($m \cdot s^{-1}$)	TA /°C	ME /kPa	HR /%	S /h	TL /°C	TH /°C	$CWDI$ /%
P /mm	-0.33	0.00	-0.05	-0.05	-0.44	-0.04	0.06	0.01	0.09	-0.75
PR /kPa	0.05	-0.02	-0.02	0.04	0.16	-0.01	0.01	-0.01	-0.10	0.09
SW /($m \cdot s^{-1}$)	0.12	0.00	0.14	0.01	0.28	0.05	-0.05	-0.01	0.01	0.55
TA /°C	-0.15	0.01	-0.01	-0.11	-0.57	-0.01	0.02	0.03	0.28	-0.52
ME /kPa	-0.21	0.00	-0.06	-0.09	-0.67	-0.05	0.06	0.02	0.20	-0.80
HR /%	-0.18	0.00	-0.09	-0.02	-0.43	-0.07	0.08	0.01	-0.02	-0.73
S /h	0.18	0.00	0.07	0.02	0.37	0.06	-0.10	-0.01	0.02	0.61
TL /°C	-0.18	0.00	-0.04	-0.10	-0.63	-0.03	0.04	0.03	0.24	-0.66
TH /°C	-0.10	0.01	0.01	-0.10	-0.46	0.01	-0.01	0.02	0.29	-0.33

表 2 表示气象因子对 $CWDI$ 的直接通径分析,由通径系数定义可知,正值表示气象因子对 $CWDI$ 正相关,即引起干旱的气象因素。从表 2 和表 3 得出,对 $CWDI$ 影响因素最大的是水汽压,它对 $CWDI$ 作用是负相关,直接通径系数为 -0.67 ,对回归系数贡献值是 -0.8 。表 3 是各气象因素对 $CWDI$ 的间接影响,从表中看出,与风速和日照相关的通径系数基本为正值,与气压相关的通径系数大多为 0,在对 $CWDI$ 正相关因素中,日照对回归方程估测可靠程度为 0.61,风速为 0.55。

由各气象因子间的间接作用可知各气象因子间相互影响,因而 $CWDI$ 变化受各气象因子共同作用,各气象因子对 $CWDI$ 的正相关影响大小依次为:日照、风速、气压;对 $CWDI$ 负相关影响因素依次为水汽压、湿度、降水量、湿度、最低气温、气温、最高温度。

3 结论与讨论

(1) 1952—2013 年昆明地区水稻生长季水分盈亏指数表示该地区水稻生长整体处于干旱状态,在进入雨季的 5、6 月份,因降雨量充沛,所以水分盈亏指数处于计算期内的最低值,为轻旱级别。在计算期内,昆明地区水稻生长需水量 ET_c 较为稳定,旬需水量均值为 32.55 mm。自 7 月后,水分盈亏指数

$CWDI$ 开始波动上升,在水稻生长季最后阶段至 9 月上旬, $CWDI$ 达到 53.79%,为重旱级别,这与降水量减少有密切关系。

(2) 水稻生长季返青、分蘖、拔节、抽穗、乳熟和黄熟阶段内 $CWDI$ 变异系数均很小,分别为 1.8%、1.9%、1.3%、1.1%、0.8%、0.8%, $CWDI$ 在 1952—2013 年时间分布稳定,没有出现较大波动值,这表示在 62 a 的计算期中,昆明地区水稻生长季的干旱等级年际变化较小。

(3) 在利用 Mann - Kendall 对昆明地区 1952—2013 年 $CWDI$ 年际变化规律趋势分析中,水分盈亏指数均大于 15%,说明昆明地区水稻生长季处于干旱期;UF 统计量和 UB 统计量的曲线在 2009 年出现交点,这说明近年干旱是从 2009 年开始,并且有逐年严重的趋势。

(4) 在各气象因子对 $CWDI$ 的通径分析中,日照对 $CWDI$ 的通径系数为 -0.1 ,对回归方程估测可靠程度贡献值达到了 0.61,因此 $CWDI$ 正相关对日照时数最敏感,负相关最敏感气象因素为水汽压;日照时数是引起昆明地区水分盈亏指数 $CWDI$ 变化最主要的气象因子,其它正相关影响因素依次是风速、气压。负相关影响因素依次为水汽压、湿度、降水量、湿度、最低气温、气温、最高温度。

根据相关研究,今年来西南地区气温呈显著上升趋势,但昆明地区近 62 a 作物水分盈亏指数中表现出影响最大因素不是温度,而是风速,这与冯禹^[24]对川中丘陵地区参考作物蒸散量时空变化特征结果相同。参考作物蒸散量一定程度上和水分盈亏指数一致,现阶段针对昆明地区水稻生长季的水分盈亏指数变化研究较少,主要是研究云南地区乃至整个西南地区。本文仅从水分盈亏指数出发,利用国家标准定义干旱等级,确定昆明地区水稻生长季干旱情况,若能在以后的研究中将昆明地区水稻生长季干旱等级进行划分,则可以为昆明地区水稻生长季灌溉提供理论支持。

参 考 文 献:

- [1] 秦大河,丁一汇,苏纪兰,等.中国气候与环境演变评估 I:中国气候与环境变化及未来趋势[J].气候变化研究进展,2005,1(1):4-9.
- [2] 谢应齐,杨子生.云南省农业自然灾害区划[M].北京:中国农业出版社,1995.
- [3] 马振锋,彭 骏,高文良,等.近 40 年西南地区的气候变化事实[J].高原气象,2006,25(4):633-642.
- [4] 李宝贵,彭世祺.1998—2007 年中国农业用水报告[M].北京:中国农业出版社,2009.
- [5] 王卫光,孙风朝,彭世彰,等.水稻灌溉需水量对气候变化响应的模拟[J].农业工程学报,2013,29(14):90-98.
- [6] 杨艳昭,张伟科,封志明,等.干旱条件下南方红壤丘陵地区水分平衡[J].农业工程学报,2013,29(12):110-119.
- [7] 周玉良,周 平,金菊良,等.基于供水水源的干旱指数及在昆明干旱频率分析中应用[J].水利学报,2014,45(9):1038-1047.
- [8] 黄会平.1949—2007 年全国干旱灾害特征、成因及减灾对策[J].干旱区资源与环境,2011,24(11):94-98.
- [9] 刘雪梅,宋国强,程平顺,等.贵州省夏旱特征及分区研究[J].高原气象,1997,16(3):292-299.
- [10] 王明田,王 翔,黄晚华,等.基于相对湿润度指数的西南地区季节性干旱时空分布特征[J].农业工程学报,2012,28(19):85-92.
- [11] 詹 存,梁 川,赵 璐.川中丘陵区季节性干旱时空分布特征及成因分析[J].农业工程学报,2013,29(21):82-90.
- [12] McKee T B, Doesken N J, Kleist J. The relation - ship of drought frequency and duration to time scales[C]//Proceedings of the 8th Conference of Applied Climatology. Anaheim, California, 1993:179-184.
- [13] 王劲松,郭江勇,周跃武,等.干旱指标研究的进展与展望[J].干旱区地理,2007,30(1):60-65.
- [14] 张艳红,吕厚荃,李 森.作物水分亏缺指数在农业干旱监测中的适用性[J].气象科技,2008,35(5):596-600.
- [15] 黄晚华,杨晓光,曲辉辉,等.基于作物水分亏缺指数的春玉米季节性干旱时空特征分析[J].农业工程学报,2009,25(8):28-34.
- [16] Allen R G, Pereira L S, Raes D, et al. Crop Evapotranspiration-guidelines for computing crop water requirements[M]. Rome: Food and Agriculture Organization of United Nation,1998.
- [17] 陈玉民,郭国双,王广兴,等.中国主要作物需水量与灌溉[M].北京:中国水利电力出版社,1995.
- [18] 冯利华.干旱等级和旱灾程度的定量表示法[J].农业系统科学与综合研究,2003,19(3):230-231.
- [19] 马开玉,丁裕国,屠其璞,等.气候统计原理与方法[M].北京:气象出版社,1993.
- [20] 李 勇,杨晓光,叶 清,等.1961—2007 年长江中下游地区水稻需水量的变化特征[J].农业工程学报,2011,27(9):175-183.
- [21] 王卫光,邢万秋,彭世彰,等.海河流域 50 年来参考腾发量的时空变化规律及其影响原因[J].应用基础与工程科学学报,2012,20(2):237-252.
- [22] 魏凤英.现代气象统计诊断与预测技术[M].北京:气象出版社,2007:63-66.
- [23] 魏清顺,孙西欢,刘在伦.导流器几何参数对潜水泵性能影响的通径分析[J].排灌机械工程学报,2014,32(3):202-207.
- [24] 冯 禹,崔宁博,魏新平,等.川中丘陵区参考作物蒸散量时空变化特征与成因分析[J].农业工程学报,2014,30(14):78-86.
- [25] 蔡甲冰,刘 钰,许 迪,等.基于通径分析原理的冬小麦缺水诊断指标敏感性分析[J].水利学报,2008,39(1):83-90.