

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.09.027

河南省主粮作物需水量变化趋势与成因分析^{*}

刘小刚¹ 符娜^{1,2} 李闯¹ 王露¹ 杨启良¹

(1. 昆明理工大学现代农业工程学院, 昆明 650500; 2. 西安理工大学水利水电学院, 西安 710048)

摘要: 河南省是我国粮食主产区,研究河南省主粮作物的灌溉需水变化规律可为水分高效管理和节水增粮提供实践参考。基于河南省 18 个气象站点 1958—2013 年逐日气象观测资料,根据 FAO 推荐的 Penman - Monteith 公式计算参考作物蒸发蒸腾量及冬小麦和夏玉米各生育期需水量,利用时间序列分析法和 ArcGIS 普通克里金插值法研究需水量时空变化特征,采用通径分析法研究作物需水量的变化成因。结果表明:河南省近 56 a 来年均参考作物蒸发蒸腾量为 807.0 mm/a,日均蒸发蒸腾量为 2.2 mm/d,呈波动减少趋势,其中西北和东南地区参考作物蒸发蒸腾量最大,豫西地区的参考作物蒸发蒸腾量跨度较大。冬小麦和夏玉米的净灌溉需水量分别为 350 ~ 525 mm 和 243 ~ 368 mm,灌溉需求指数随经度和纬度的增加而增大,冬小麦生长对灌溉的依赖程度高于夏玉米。影响河南省主粮作物需水量的气象因子主要为气温、水汽压、日照、最高气温和风速。

关键词: 河南省 主粮作物 需水量 时间序列分析 通径分析

中图分类号: S274 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2015)09-0188-10

Trends and Causes Analysis of Water Requirement for Main Grain Crops in Henan Province

Liu Xiaogang¹ Fu Na^{1,2} Li Chuang¹ Wang Lu¹ Yang Qiliang¹

(1. Faculty of Modern Agricultural Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500, China

2. Institute of Water Resources and Hydro-electric Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

Abstract: Henan Province is a main grain crops producing area in China, and water requirement trends of the main grain crops is an important basis for agriculture water saving and yield increasing. Based on the daily meteorological data from 18 stations in Henan Province during 1958 and 2013, reference crop evapotranspiration (ET_0) and water requirement of winter wheat and summer maize in growth period were estimated by using FAO Penman - Monteith equation and crop coefficient. Time series analysis was used to analyze temporal distribution characteristics of ET_0 and water requirement. Kriging of ArcGIS was introduced to draw the maps of ET_0 and water requirement that could present a clear spatial distribution of that, and the causes of water requirement change were manifested by path analysis method. The research results showed that the value of ET_0 in Henan Province ranged from 672 mm to 977 mm, and the average values were 807.0 mm per year and 2.2 mm per day, which was decreased in recent 62 years. The maximum ET_0 appeared in the northwest and southeast of Henan Province, and ET_0 showed a significant difference around the western area. The water requirement of winter wheat and summer maize were 390 ~ 562 mm and 314 ~ 426 mm, respectively. The irrigation requirement of winter wheat and summer maize were 350 ~ 525 mm and 243 ~ 368 mm, respectively. The index of irrigation requirement of winter wheat and summer maize were 0.77 ~ 0.90 and 0.66 ~ 0.83, respectively. The main grain crops irrigation requirement index of Henan Province tended to increase with the latitude and longitude, and summer

收稿日期: 2015-04-12 修回日期: 2015-06-28

^{*} 国家自然科学基金资助项目(51109102, 51379004, 51469010)、云南省应用基础研究资助项目(2014FB130、2013FB024)和云南省教育厅重点资助项目(2011Z035)

作者简介: 刘小刚,副教授,博士,主要从事水资源高效利用研究,E-mail: liuxiaogangjy@126.com

maize had less dependence on irrigation than winter wheat. When each meteorological factor was removed respectively in sensitively analysis, the reliability of the regression equation was estimated by the remained eight meteorological factors. The main meteorological factors that influence water requirement of the main grain crops were temperature, vapor pressure, sunshine duration, maximum temperature and wind speed.

Key words: Henan Province Main grain crops Water requirement Time series analysis Path analysis

引言

河南省是我国粮食生产大省,自 2000 年以来粮食总产量连续 12 年位居全国第一^[1]。2012 年河南粮食作物播种面积达 9 985 150 hm²,以冬小麦和夏玉米轮作一年两熟为主,其中冬小麦 5 340 000 hm²,玉米 3 100 000 hm²,两者占粮食作物播种总面积的 84.5%^[2]。自国家粮食战略工程河南核心区建设规划实施以来,河南省粮食产量实现九连增,2012 年达到 563.5 亿 kg^[3]。但河南省也是我国严重缺水地区之一,同时降水时空分布不均,主粮作物生长期降雨量偏少^[4]。因此,探明主粮作物需水时空分布特征和成因有助于节水增粮和优化粮食作物水分管理措施,并为中原粮仓水资源优化管理提供基础数据。

目前针对气候变化条件下的作物耗水量和灌溉需水量变化规律研究成果较多^[5-9]。尹海霞等^[5]根据黑河流域中游地区逐日气象资料,利用 FAO Penman - Monteith 模型和作物系数得到主要作物不同生育阶段的需水量,分析预测了需水量的变化特征及趋势,并对作物耗水的驱动因子进行了相关性分析。王卫光等^[6]根据气象数据和 HadCM3 大气环流模式 A2 和 B2 两种情景下的统计降尺度模拟结果,利用 ORYZA2000 模型探明水稻灌溉需水量对气候变化的响应规律。王宏等^[7]利用气象资料和生育期资料,计算并研究承德地区春玉米需水量和水分盈亏的变化规律,同时分析了气象因子对春玉米需水量的影响。Tabari 等^[8]采用支持向量机、自适应神经网络和回归分析方法对伊朗半干旱高原环境参考作物腾发量进行建模分析。Nkomozepe 等^[9]采用 GCM 模型及 CROPWAT 模型分析预测了津巴布韦自然农业生态区玉米需水量及净灌溉需水量,揭示了气候变化对作物需水量的影响程度。近年来,作物需水量及其对气候的响应已成为人们关注水资源的一个重要方面,关于河南省作物需水量变化趋势及成因已有相关研究,但大多采用传统的趋势分析法、相关分析法进行需水量的变化成因分析,未能对各气象因子的影响程度进行定量分析,同

时有关河南省主粮作物需水量、净灌溉需水量及灌溉需求指数的空间分布研究较少。

本文根据河南省 18 个气象站点 1958—2013 年的长序列逐日气象资料,计算冬小麦和夏玉米需水量及净灌溉需水量,分析河南省主粮作物需水量的时空分布规律,并采用通径分析法研究主粮作物需水量的变化成因,旨在为河南省主粮作物科学灌溉提供参考。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

河南省(110°21' ~ 116°39'E,31°23' ~ 36°22'N)位处中纬度地带,冷暖气团交替频繁,大陆性季风气候显著。全省平均气温 14.5℃,平均温差 10.6℃,年均降水量 632.1 mm,年均日照 1 911.0 h,相对湿度 70.0%,平均风速 2.2 m/s,全年无霜期 210 d 左右。18 个代表站点分别为:安阳市、新乡市、三门峡市、卢氏县、孟津县、郑州市、南阳市、西华县、驻马店市、信阳市、固始县、栾川县、许昌市、开封市、西峡县、宝丰县、商丘市和洛阳市。

1.2 数据来源

本研究采用的气象数据来自中国气象科学数据共享服务网,选取河南省 18 站点 1958—2013 年逐日地面气象观测资料,包括日降水量、日平均气温、日最高气温、日最低气温、日平均水汽压、日平均相对湿度、日照时数、日平均风速等数据。其中洛阳市站点气象数据截至 1991 年,本研究采用数据插补中的均值替换法,根据栾川县站点和孟津县站点各气象数据的均值填充该区 1992—2013 年缺失的数据。

1.3 研究方法

1.3.1 作物需水量

作物需水量可由水量平衡法计算得到,也可由综合性的气候学方法计算得到。本研究采用作物系数计算冬小麦和夏玉米需水量,其公式为

$$ET_c = \sum ET_{ci} = \sum K_{ci} ET_{0i} \tag{1}$$

式中 ET_c ——作物全生育期的需水量,mm
 ET_{ci} ——作物各生育阶段的需水量,mm

K_{ci} ——各生育阶段的作物系数
 ET_{0i} ——相应时段的参考作物蒸发蒸腾量,
mm

其中,冬小麦在播种-返青期、返青-抽穗期、抽穗-成熟期的作物系数 K_{ci} 分别为 0.70、1.15 和 0.40,夏玉米在播种-拔节期、拔节-灌浆期、灌浆-成熟期的作物系数 K_{ci} 分别为 0.40、1.15 和 1.05^[10]。参考作物蒸发蒸腾量 ET_0 采用 FAO 推荐的 Penman - Monteith 公式计算,以能量平衡和水汽扩散论为基础,同时考虑作物的生理特征和空气动力学参数的变化,具有较充分的理论依据和较高的计算精度^[11]。其公式为

$$ET_0 = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} U_2 (e_a - e_d)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34U_2)} \quad (2)$$

式中 Δ ——饱和水汽压与温度关系曲线在 T 处的切线斜率, kPa/℃

R_n ——冠层表面净辐射量, MJ/(m²·d⁻¹)

G ——土壤热通量, MJ/(m²·d⁻¹)

γ ——干湿比常数, kPa/℃

T ——平均温度,℃

U_2 ——2 m 高处的平均风速, m/s

e_a ——实际水汽压, kPa

e_d ——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。

1.3.2 净灌溉需水量与需求指数

作物的净灌溉需水量等于生育期内作物需水量与有效降水量之差^[12]。灌溉需求指数为净灌溉需水量与需水量的比值,反映作物生长对灌溉的依赖程度^[13]。其公式为

$$V_{IR} = ET_c - P_e \quad (3)$$

$$V_{DI} = V_{IR}/ET_c \quad (4)$$

式中 V_{IR} ——作物日净灌溉需水量, mm/d

P_e ——日有效降水量, mm/d

V_{DI} ——作物灌溉需求指数

影响有效降水量的因素多而复杂,本文采用应用最广的美国农业部土壤保持局推荐方法计算^[14-16],即

$$P_e = \begin{cases} P(4.17 - 0.2P)/4.17 & (P < 8.3 \text{ mm/d}) \\ 4.17 + 0.1P & (P \geq 8.3 \text{ mm/d}) \end{cases} \quad (5)$$

式中 P ——日降水量, mm/d

1.3.3 时间序列分析法

采用时间序列分析法分析参考作物蒸发蒸腾量

及冬小麦和夏玉米生育期需水量的年际变化趋势,主要指标为气候趋势系数和气候倾向率^[17-18]。

气候趋势系数(r_{xt})为 n 个时刻(年)所对应的要素序列与自然数列 1, 2, ..., n 的相关系数。

$$r_{xt} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(i - \bar{t})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (i - \bar{t})^2}} \quad (6)$$

其中

式中 n ——年数 x_i ——第 i 年要素值

$\bar{x}$ ——样本均值

通常使用 t 检验法($r_{xt} \sqrt{n-2} / \sqrt{1-r_{xt}^2}$ 符合自由度 $n-2$ 的 t 分布)检验气候趋势是否显著。如果 n 个时刻所对应的要素序列与自然数列显著相关,表示该要素在所计算的 n 年内气候趋势明显,存在线性增加(减少)趋势。

计算气候倾向率,首先将要素的趋势变化用线性方程表示,即: $\hat{x}_t = a_0 + a_1 t, t = 1, 2, \dots, n$ 。 $\hat{x}_t$ 为要素的拟合值, t 为年份序列号, a_0 为常数, a_1 为回归系数; $10a_1$ 称为倾向率,表示要素每 10 a 的变化率。

将冬小麦和夏玉米需水量或净灌溉需水量(x)的长期变化趋势采用线性回归方程分析,其公式为

$$\bar{X} = a_0 + a_1 t \quad (t = 1, 2, \dots, n) \quad (7)$$

其中

$$a_1 = d\bar{x}_1/dt$$

当 a_1 为正或负时,表示要素在计算时段内线性增加或减弱。

1.3.4 通径分析

通径分析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^[19-20],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^[21]。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

$$y = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + \dots + b_n x_n \quad (8)$$

根据各自变量间的简单相关系数 $r_{x_i x_j}$ ($i, j \leq n$) 和各自变量与因变量间的简单相关系数 $r_{y x_i}$ ($i \leq n$),由式(8)通过数学变换,可建立正规矩阵方程为

$$\begin{bmatrix} 1 & r_{x_1 x_2} & \dots & r_{x_1 x_n} \\ r_{x_2 x_1} & 1 & \dots & r_{x_2 x_n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ r_{x_n x_1} & r_{x_n x_2} & \dots & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p_{y x_1} \\ p_{y x_2} \\ \vdots \\ p_{y x_n} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_{x_1 y} \\ r_{x_2 y} \\ \vdots \\ r_{x_n y} \end{bmatrix} \quad (9)$$

解方程(9)即可求出通径系数 $p_{y x_i}, p_{y x_i}$ 表示自变

量 x_i 对因变量 y 的直接通路系数,为 x_i 对因变量 y 的直接作用效应; $r_{x_i p_{y x_j}}$ 表示自变量 x_i 通过 x_j 对因变量 y 的间接通路系数,为 x_i 通过 x_j 对因变量 y 的间接作用效应。剩余项的通路系数 $p_{y e}$ 表示为

$$p_{y e} = \sqrt{1 - (r_{x_1 y} p_{y x_1} + r_{x_2 y} p_{y x_2} + \cdots + r_{x_n y} p_{y x_n})}$$
 (10)

如果剩余项的通路系数 $p_{y e}$ 较小,说明已找出主要因素;如果 $p_{y e}$ 数值较大,则表明还有更重要的因素未被考虑在内。

1.4 数据处理

基于河南省 18 个气象站点 1958—2013 年逐日地面气象观测资料,采用 Microsoft Excel 软件完成数据预处理,根据 FAO - 56 标准 Penman - Monteith 公式和作物系数计算各站点逐日的参考作物蒸发蒸腾量及冬小麦和夏玉米需水量,得出净灌溉需水量和灌溉需求指数;利用 SPSS 软件的时间序列分析法,分析参考作物蒸发蒸腾量及主粮作物生育期需水量的年际变化趋势;借助 ArcGIS 10.2 软件的空间分析功能,绘制河南省 18 个站点不同年代主粮作物的平均需水量空间分布图,研究需水量、净灌溉需水量和灌溉需求指数的空间分布规律;同时利用通路分析法研究主粮作物需水量的变化成因。

2 结果与分析

2.1 参考作物蒸发蒸腾量的时空特征

河南省参考作物蒸发蒸腾量的年际变化趋势如图 1 所示。由图 1 可知,河南省多年平均年参考作物蒸发蒸腾量为 807.0 mm/a,平均日蒸发蒸腾量为 2.2 mm/d。近 56 a 来河南省参考作物蒸发蒸腾量呈波动减少趋势,倾向率为 -1.438 mm/a。其中 1964、1989、2003 年参考作物蒸发蒸腾量出现明显低值,1989 年出现最小值为 672.1 mm,1966 年出现峰值为 977.0 mm。

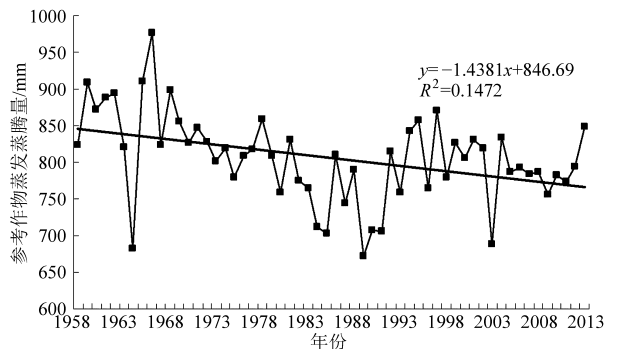


图1 河南省参考作物蒸发蒸腾量年际变化趋势
Fig. 1 Variation curve of yearly reference crop evapotranspiration in Henan Province

河南省参考作物蒸发蒸腾量空间分布见图 2,参考作物蒸发蒸腾量多年均值为 660 ~ 902 mm。西

北和东南地区参考作物蒸发蒸腾量最大,豫西地区的跨度较大。省内中部与北部地区蒸发蒸腾量处于中等,为 781 ~ 821 mm。

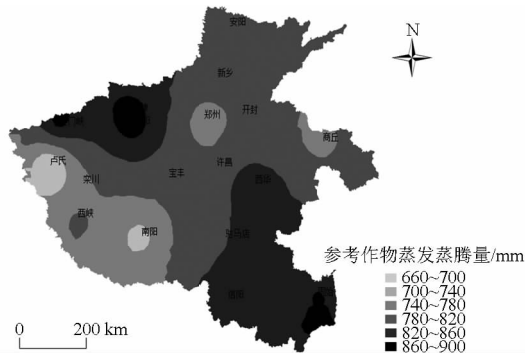


图2 河南省参考作物蒸发蒸腾量的空间分布
Fig. 2 Spatial distribution of reference crop evapotranspiration in Henan Province

2.2 主粮作物需水量年际变化趋势

河南省冬小麦和夏玉米生育期需水量和净灌溉需水量的均值及其年际变化趋势如表 1 所示。研究表明,新乡市、孟津县、信阳市、固始县、开封市和西峡县 6 个站点冬小麦生育期需水量及净灌溉需水量随年份呈上升趋势,孟津县和信阳市的上升趋势最为明显,其中信阳市的上升速率最高,该站点冬小麦生育期需水量及净灌溉需水量的倾向率分别为 1.60 mm/a 和 1.78 mm/a;南阳市、驻马店市、栾川县和洛阳市 4 个站点冬小麦生育期需水量和净灌溉需水量的年际变化趋势相反,生育期需水量随年份呈增大趋势,而净灌溉需水量呈减小趋势;安阳市、三门峡市、西华县、宝丰县和商丘市 5 个站点冬小麦生育期需水量和净灌溉需水量随年份明显下降,其中西华县下降速率最高,该站点冬小麦生育期需水量和净灌溉需水量的倾向率分别为 -1.60 mm/a 和 -1.39 mm/a。

河南省 18 个站点夏玉米生育期需水量和净灌溉需水量随年份均呈下降趋势,其中三门峡市、卢氏县、郑州市、南阳市、西华县、驻马店市、固始县、许昌市、宝丰县、商丘市和洛阳市 11 个站点夏玉米生育期需水量和净灌溉需水量随年份下降趋势明显。西华县下降速率最高,夏玉米生育期需水量和净灌溉需水量倾向率分别为 -2.27 mm/a 和 -2.03 mm/a;栾川县夏玉米生育期需水量和净灌溉需水量随年份变化较小,分别为 -1.30 mm/a 和 -0.46 mm/a。

2.3 主粮作物需水量的空间分布特征

河南省冬小麦和夏玉米生育期需水量、净灌溉需水量及灌溉需求指数的空间分布特征如图 3 所示。研究表明:冬小麦全生育期需水量在 390 ~ 562 mm 之间,均值为 472.7 mm,其中豫西北及豫南地区需

表 1 河南省冬小麦和夏玉米需水量均值及年际变化趋势

Tab.1 Average and variation trend of yearly water requirement of winter wheat and summer maize in Henan Province

站名	冬小麦				夏玉米			
	生育期	生育期	净灌溉需水量/mm	净灌溉需水量倾向率/(mm·a ⁻¹)	生育期	生育期	净灌溉需水量/mm	净灌溉需水量倾向率/(mm·a ⁻¹)
	需水量/mm	需水量倾向率/(mm·a ⁻¹)			需水量/mm	需水量倾向率/(mm·a ⁻¹)		
安阳市	521.50	-1.33	493.20	-1.21	417.70	-0.98	360.10	-0.83
新乡市	520.90	0.30	488.00	0.27	417.00	-0.73	356.90	-0.55
三门峡市	535.80	-1.48	495.90	-1.28	425.90	-2.20	367.20	-2.01
卢氏县	390.70	-0.27	351.70	-0.12	314.70	-1.64	250.70	-1.30
孟津县	561.70	1.30	524.40	1.37	394.70	-0.82	338.50	-0.62
郑州市	523.70	-0.64	492.90	-0.40	372.70	-2.23	366.40	-1.17
南阳市	419.10	-0.01	376.30	0.18	390.10	-1.52	325.40	-1.39
西华县	432.10	-1.60	389.90	-1.39	350.60	-2.27	287.70	-2.03
驻马店市	438.60	-0.08	397.80	0.07	367.70	-1.52	309.20	-1.37
信阳市	430.60	1.60	380.50	1.78	370.40	-0.89	308.60	-0.66
固始县	459.80	0.60	405.10	0.64	371.50	-1.35	305.50	-1.47
栾川县	439.10	-0.69	380.00	1.03	323.60	-1.30	243.40	-0.46
许昌市	454.80	-0.57	419.90	-0.31	366.20	-1.27	311.30	-1.12
开封市	501.60	0.33	469.70	0.49	415.70	-0.97	358.80	-0.89
西峡县	462.30	0.64	416.70	0.82	405.10	-0.89	327.30	-0.69
宝丰县	496.40	-1.30	457.80	-1.14	388.90	-1.77	330.20	-1.66
商丘市	419.40	-1.11	387.00	-0.91	343.60	-2.04	286.70	-1.77
洛阳市	514.80	-0.12	483.90	0.24	365.60	-1.54	326.80	-1.33

水量相对较大,孟津县冬小麦需水量最大,为561.7 mm,卢氏县需水量最小,为390.7 mm;河南省冬小麦生育期多为旱季,有效降水量较少,因此净灌溉需水量较大,为350~525 mm,均值为435.0 mm。冬小麦生育期净灌溉需水量空间整体分布与生育期需水量接近,豫西北及豫南地区净灌溉需水量较大,中部地区较小,最大值出现的地区与需水量相一致。其中孟津县的净灌溉需水量最大,为524.4 mm;卢氏县的净灌溉需水量最小,为351.7 mm。冬小麦净灌溉需求指数在0.77~0.90之间,均值为0.85,表明该区冬小麦生长对灌溉的依赖程度较高,其中豫西南地区灌溉需求指数相对较低,需求指数随着经度和纬度的增加而增大。

河南省夏玉米生长期一般为6月上旬至9月中旬,全生育期为102~106 d,省内夏玉米全生育期需水量在314~426 mm之间,均值为377.9 mm。从具体分布情况来看,除豫西南地区需水量较少外,其他地区需水量分布比较均匀,其中三门峡市夏玉米需水量最大,为425.9 mm,卢氏县需水量最小,为314.7 mm;河南省夏玉米生育期为雨季,有效降水量较多,所需净灌溉需水量较小,在243~368 mm之间,均值为320.0 mm。豫西北及豫南地区净灌溉需水量相对较大,其中最大净灌溉需水量为三门峡市,为367.2 mm,最小的卢氏县为243.4 mm。夏玉米净灌溉需求指数在0.66~0.83之间,均值为

0.75,相对冬小麦而言,夏玉米生长对灌溉的依赖程度稍低,整体分布趋势与冬小麦大致相同,西南部灌溉需求指数较低,需求指数随经度和纬度的增加而增大。

2.4 主粮作物需水量变化成因分析

2.4.1 气象因子对主粮作物需水量的通径分析

计算9个气象因子的通径系数,并求解气象因子对作物需水量关于通径系数的正规矩阵方程组,最后分析各气象因子对作物需水量的直接作用(通径系数)和间接作用,结果见表2、3。

由气象因子对冬小麦需水量的通径分析(表2)和显著性检验可知,气温对冬小麦需水量的通径系数为0.69,在各项指标中最大,为极显著通径系数;其次依次为水汽压、日照时数、最高气温、湿度、风速,各项通径系数分别为-0.45、0.32、-0.29、-0.27、0.24,均为显著通径系数;降水量、气压、最低气温3因素对冬小麦需水量作用不明显。

由气象因子对夏玉米需水量的通径分析(表3)和显著性检验发现,各气象因子对河南省夏玉米与冬小麦需水量的影响规律相似,其中气温对夏玉米需水量的通径系数为0.53,为极显著通径系数。其次是水汽压、日照时数、最高气温、风速,通径系数分别为-0.52、0.40、-0.34、0.31,为显著通径系数。根据通径分析可知,降水量、气压、湿度、最低气温4个气象因素对夏玉米的需水量影响不大。

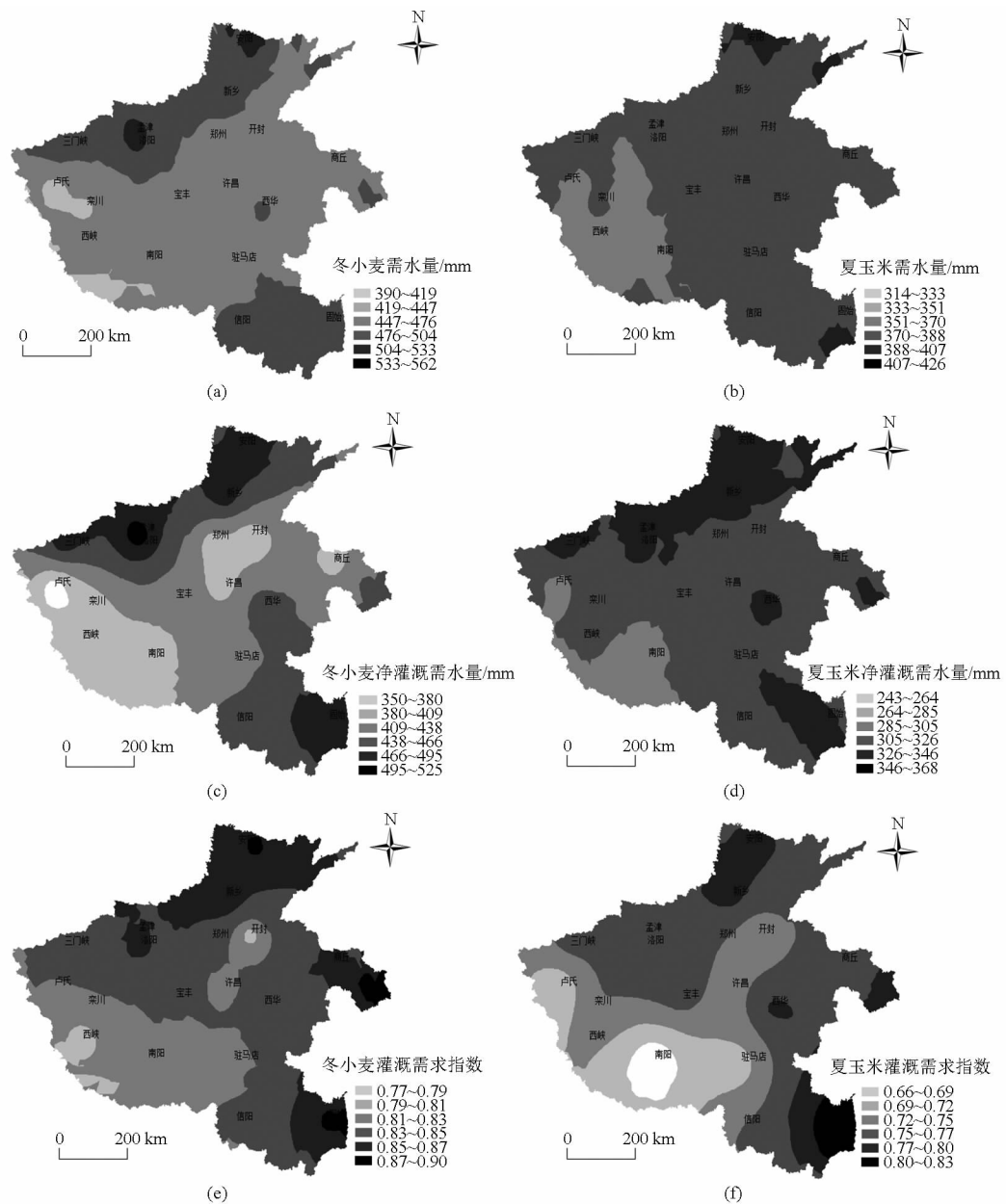


图3 河南省冬小麦和夏玉米需水量、净灌溉需水量和灌溉需求指数的空间分布

Fig.3 Spatial distribution of yearly water requirement, net irrigation requirement and irrigation requirement index of winter wheat and summer maize in Henan Province

(a) 冬小麦需水量 (b) 夏玉米需水量 (c) 冬小麦净灌溉需水量
(d) 夏玉米净灌溉需水量 (e) 冬小麦灌溉需求指数 (f) 夏玉米灌溉需求指数

表2 气象因子对河南省冬小麦需水量的通径分析

Tab.2 Path analysis between meteorological factors and water requirement of winter wheat in Henan Province

气象因子	通径系数	间接作用								
		降水量	气压	风速	气温	水汽压	湿度	日照时数	最低气温	最高气温
降水量	-0.03		0.01	0.03	0.06	-0.09	-0.09	-0.09	-0.01	0
气压	-0.06	0		-0.02	-0.65	0.33	0.02	-0.06	0.06	0.23
风速	0.24 *	0	0.01		0.07	0.03	0.05	0.01	-0.01	-0.01
气温	0.69 * *	0	0.05	0.01		-0.39	0.01	0.09	-0.08	-0.28
水汽压	-0.45 *	-0.01	0.04	-0.01	0.62		-0.10	0	-0.07	-0.22
湿度	-0.27 *	-0.01	0	-0.05	-0.05	-0.17		-0.18	-0.01	0.05
日照时数	0.32 *	0.01	0.01	0.01	0.34	-0.01	0.15		-0.01	-0.13
最低气温	-0.08	0	0.04	0.02	0.73	-0.40	-0.03	0.02		-0.25
最高气温	-0.29 *	0	0.04	0.01	0.64	-0.34	0.05	0.15	-0.07	

表 3 气象因子对河南省夏玉米需水量的通径分析

Tab.3 Path analysis between meteorological factors and water requirement of summer maize in Henan Province											
气象因子	通径系数	间接作用									
		降水量	气压	风速	气温	水汽压	湿度	日照时数	最低气温	最高气温	间接和
降水量	-0.01		0	0.02	-0.08	-0.06	-0.05	-0.13	0	0.01	-0.29
气压	0.01	0		-0.05	-0.40	0.30	0	-0.07	-0.05	0.03	-0.25
风速	0.31 *	0	0		0.07	0.04	0.02	0.03	0.01	-0.01	0.17
气温	0.53 * *	0	-0.01	0.04		-0.32	0.04	0.17	0.06	-0.04	-0.05
水汽压	-0.52 *	0	0	-0.03	0.33		-0.07	-0.02	0.06	-0.01	0.26
湿度	-0.14	0	0	-0.07	-0.16	-0.28		-0.23	0.01	0.02	-0.71
日照时数	0.40 *	0	0	0.02	0.22	0.04	0.09		0	-0.03	0.35
最低气温	0.08	0	-0.01	0.04	0.45	-0.42	-0.01	0.01		-0.02	0.03
最高气温	-0.34 *	0	-0.01	0.03	0.49	-0.20	0.07	0.24	0.05		0.68

由直接通径系数结果可知,气温、水汽压、日照时数、最高气温、湿度、风速是影响冬小麦需水量的显著气象因子,除湿度外上述 5 因子也为影响夏玉米需水量的显著因素。综上分析可得,影响河南省主粮作物需水量的主要气象因子为气温、水汽压、日照时数、最高气温和风速。由气象因子的间接作用可知,各气象因子相互制约、相互影响,因而河南省冬小麦和夏玉米需水量变化受各气象因子共同作用。

2.4.2 指标敏感性分析

减少某个气象因子后其余气象因子对作物需水

量的通径分析结果有所变化,并引起回归方程估测可靠程度 E 、直接作用和间接作用的响应。逐步减去最不敏感气象因子对冬小麦需水量的通径分析结果(表 4)表明,与 9 个气象因子的分析结果相比,在分别去掉降水量、气压、风速、气温、水汽压、湿度、日照时数、最低气温和最高气温后, E 由 0.87 分别降为 0.79、0.85、0.76、0.58、0.66、0.83、0.44、0.63、0.49。去掉日照时数后,引起 E 变化最大,表明河南省冬小麦需水量对日照时数的变化最为敏感,其次为最高气温、气温、最低气温、水汽压、风速、降水量、湿度、气压。

表 4 逐步减去最不敏感气象因子对冬小麦需水量的通径分析

Tab.4 Path analysis of water requirement for winter wheat by gradually removing the least sensitive meteorological factor

指标数	降水量		气压		风速		气温		水汽压		湿度		日照时数		最低气温		最高气温		E
	直接	间接	直接	间接	直接	间接	直接	间接	直接	间接	直接	间接	直接	间接	直接	间接	直接	间接	
9	-0.03	-0.18	-0.06	-0.1	0.24	0.13	0.69	-0.58	-0.45	0.26	-0.27	-0.42	0.32	0.37	-0.08	0.13	-0.29	0.47	0.87
8(降水量)			-0.09	-0.49	0.20	0.11	0.70	-0.80	-0.61	0.66	-0.34	-0.15	0.33	0.41	-0.05	0.58	-0.56	0.72	0.79
8(气压)	-0.03	-0.09			0.22	0.09	0.83	-0.82	-0.55	0.81	-0.33	-0.15	0.32	0.42	-0.15	0.67	-0.55	0.72	0.85
8(风速)	0.00	-0.11	-0.25	-0.33			0.44	-0.82	-0.80	0.82	-0.38	-0.10	0.37	0.37	0.39	0.13	-0.74	0.84	0.76
8(气温)	-0.03	-0.08	-0.14	-0.44	0.20	0.11			-0.64	0.81	-0.34	-0.15	0.34	0.40	0.88	-0.35	0.22	0.46	0.58
8(水汽压)	-0.04	-0.07	0.02	-0.60	0.24	0.06	0.91	-0.85			-0.43	-0.05	0.25	0.49	-0.84	0.84	-0.59	0.73	0.66
8(湿度)	-0.05	-0.06	-0.10	-0.48	0.24	0.07	0.85	-0.72	-0.84	0.84			0.41	0.34	-0.19	0.72	-0.32	0.71	0.83
8(日照时数)	-0.07	-0.05	-0.04	-0.54	0.24	0.07	0.94	-0.81	-0.33	0.69	-0.41	-0.07			-0.74	0.89	-0.23	0.65	0.44
8(最低气温)	-0.03	-0.08	-0.10	-0.48	0.21	0.10	0.60	-0.79	-0.60	0.69	-0.33	-0.15	0.32	0.42			-0.51	0.82	0.63
8(最高气温)	-0.03	-0.08	-0.10	-0.48	0.21	0.10	0.75	-0.13	-0.60	0.61	-0.33	-0.16	0.31	0.43	0.35	0.18			0.49

注:括号中为各气象因子。

由表 5 中逐步减去最不敏感气象因子对夏玉米需水量的通径分析结果表明,在与 9 个气象因子的分析结果相比后,在分别去掉降水量、气压、风速、气温、水汽压、湿度、日照时数、最低气温和最高气温气象因子后, E 由 0.80 分别降为 0.74、0.77、0.68、0.53、0.65、0.76、0.43、0.59、0.51。在分别去掉气象因子后,引起 E 变化最大的气象因子为日照时数,表明河南省夏玉米需水量对日照时数的变化敏感性最为明显;引起需水量变化从高到低的其余气

象因子分别为:最高气温、气温、最低气温、水汽压、风速、降水量、湿度、气压。结合表 4 可知,各气象因子对河南省冬小麦和夏玉米的影响次序一致,由大到小依次为:日照时数、最高气温、气温、最低气温、水汽压、风速、降水量、湿度、气压。

3 讨论

本文基于 18 个气象站点 56 a 的逐日气象资料,分析了河南省参考作物蒸发蒸腾量及冬小麦和

表5 逐步减去最不敏感气象因子对夏玉米需水量的通径分析

Tab.5 Path analysis of water requirement for summer maize by gradually removing the least sensitive meteorological factor																				
指标数	降水量		气压		风速		气温		水汽压		湿度		日照时数		最低气温		最高气温		E	
	直接	间接	直接	间接	直接	间接	直接	间接	直接	间接	直接	间接	直接	间接	直接	间接	直接	间接		
9	-0.01	-0.29	0.01	-0.25	0.31	0.17	0.53	-0.05	-0.52	0.26	-0.14	-0.71	0.40	0.35	0.08	0.03	-0.34	0.68	0.80	
8(降水量)			-0.11	-0.47	0.20	0.11	0.71	-0.72	-0.64	0.99	-0.33	-0.15	0.32	0.41	-0.10	0.62	-0.61	0.84	0.74	
8(气压)	-0.02	-0.09			0.22	0.09	0.83	-0.75	-0.58	0.93	-0.33	-0.16	0.31	0.43	-0.22	0.74	-0.61	0.86	0.77	
8(风速)	0.00	-0.11	-0.27	-0.30			0.86	-0.69	-0.84	0.82	-0.37	-0.11	0.37	0.37	0.35	0.17	-0.79	0.89	0.68	
8(气温)	-0.03	-0.08	-0.16	-0.41	0.20	0.11			-0.68	0.80	-0.33	-0.15	0.34	0.40	0.79	-0.37	0.21	0.46	0.53	
8(水汽压)	-0.04	-0.07	0.01	-0.58	0.25	0.07	0.93	-0.76			-0.44	-0.05	0.24	0.49	-0.84	0.85	-0.65	0.83	0.65	
8(湿度)	-0.05	-0.07	-0.12	-0.45	0.24	0.07	0.89	-0.74	-0.90	0.88			0.40	0.34	-0.24	0.76	-0.38	0.78	0.76	
8(日照时数)	-0.06	-0.05	-0.06	-0.51	0.24	0.07	0.95	-0.89	-0.37	0.62	-0.41	-0.08			-0.91	0.87	-0.30	0.69	0.43	
8(最低气温)	-0.03	-0.08	-0.12	-0.46	0.21	0.11	0.76	-0.75	-0.64	0.88	-0.33	-0.16	0.32	0.41			-0.54	0.82	0.59	
8(最高气温)	-0.03	-0.08	-0.12	-0.46	0.21	0.10	0.68	-0.16	-0.64	0.88	-0.32	-0.16	0.31	0.43	0.34	0.18			0.51	

注:括号中为各气象因子。

夏玉米生育期需水量的时空变化特征。利用通径分析方法研究了河南省主要作物冬小麦、夏玉米需水量与各个气象因子之间的线性关系,找出各气象因子对主粮作物需水量影响的直接和间接效应。通径分析方法克服了简单的相关分析与回归分析的不足,比较全面地反映了各个气象因子对主粮作物需水量的综合作用效应。

河南省地势西高东低,省内冬小麦生育期需水量和净灌溉需水量的整体分布接近,西北部及南部地区较大,中部地区较小。其中新乡市、孟津县、信阳市、固始县、开封市、西峡县6 站点冬小麦生育期需水量及净灌溉需水量随年份呈上升趋势;南阳市、驻马店市、栾川县、洛阳市4 个站点冬小麦生育期需水量随年份呈增大趋势,而净灌溉需水量呈减小趋势;安阳市、三门峡市、西华县、宝丰县、商丘市5 个站点的冬小麦生育期需水量和净灌溉需水量随年份下降明显。夏玉米生育期需水量、净灌溉需水量和灌溉需求指数分布趋势与冬小麦基本一致。

作物需水规律受多种气象因素综合作用的影响,且各因子的贡献存在区域差异^[22]。近年来河南省日平均高温和低温均呈上升趋势^[23],但本研究发现河南省近56 a 平均参考作物蒸发蒸腾量呈波动减少趋势,这与姬兴杰等^[24]发现河南省1971—2010 年参考作物蒸发蒸腾量总体呈下降趋势相一致。河南省地势西高东低,地势较高的区域太阳辐射量和风速较大,因此河南省西北部参考作物蒸发蒸腾量最大,而西南区参考作物蒸发蒸腾量相对较低。作物需水量主要受辐射变量和空气动力变量共同作用的影响^[25],采用不同时期的数据或不同的分析方法可能产生不同的结论。倪广恒等^[26]发现1976—2000 年中国干旱地区与半干旱地区与半湿润地区的参考作物腾发量呈减少趋势的主要原因是风速减

小和气温升高。而刘晓英等^[27]认为,近50a 日照时数与风速减小是导致华北地区作物需水量下降的主要原因。宋妮等^[28]则认为,日照时数和最高温度是影响河南省冬小麦需水量的主要因素。根据本研究结果,影响河南省主粮作物需水量最显著的气象因素为气温、水汽压、日照时数、最高气温和风速。

由于篇幅有限,省略了较多图表,未能全部展示所得数据,如气象因子对作物需水量的总贡献等。另外,本文仅依据气象资料分析河南省主粮作物的需水量变化规律及分布特征,要获得更为准确的时空变异规律,还需考虑地形地势、海拔高度、土壤状况、灌溉条件、云层厚度、下垫面状态、土地利用及变化等综合因子的影响。

4 结论

(1)1958—2013 年河南省多年平均参考作物蒸发蒸腾量在672~977 mm 之间,呈波动减少趋势,倾向率为-1.438 mm/a。参考作物蒸发蒸腾量均值在660~902 mm 之间,其中西北和东南地区参考作物蒸发蒸腾量最大,豫西地区参考作物蒸发蒸腾量跨度较大。

(2)河南省冬小麦全生育期需水量和净灌溉需水量分别在390~562 mm 和350~525 mm 之间,冬小麦生育期需水量和净灌溉需水量的整体分布接近,西北部及南部地区较大,中部地区较小。冬小麦灌溉需求指数均值为0.77~0.90,冬小麦生长对灌溉的依赖程度较高,其中河南省西南部灌溉需求指数相对较低,需求指数随着经度和纬度的增加而增大。

(3)河南省夏玉米全生育期需水量和净灌溉需水量分别在314~426 mm 和243~368 mm 之间,随年份均呈下降趋势。夏玉米生育期需水量、净灌溉

需水量和灌溉需求指数分布趋势与冬小麦大致相同,净灌溉需求指数在 0.66~0.83 之间,夏玉米生长对灌溉的依赖程度比冬小麦稍低。

(4)影响河南省主粮作物需水量的气象因子主要是气温、水汽压、日照时数、最高气温和风速,逐步

减去最不敏感气象因子得出河南省主粮作物需水量对各气象因子的敏感性由大到小依次为:日照时数、最高气温、气温、最低气温、水汽压、风速、降水量、湿度、气压。

参 考 文 献

- 1 成林,刘荣花,王信理. 气候变化对河南省灌溉小麦的影响及对策初探[J]. 应用气象学报, 2012, 23(5):571-577.
Cheng Lin, Liu Ronghua, Wang Xinli. Possible impacts of future climate change on irrigated winter wheat and adaptive strategies in Henan Province [J]. Journal of Applied Meteorological Science, 2012, 23(5):571-577. (in Chinese)
- 2 余卫东,赵国强,陈怀亮. 气候变化对河南省主要农作物生育期的影响[J]. 中国农业气象, 2007, 28(1):9-12.
Yu Weidong, Zhao Guoqiang, Chen Huailiang. Impacts of climate change on growing stages of main crops in Henan Province[J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 2007, 28(1):9-12. (in Chinese)
- 3 白景锋,杨杰. 河南省主要农作物虚拟水空间分布及水资源配置研究[J]. 地域研究与开发, 2012, 31(3):167-171.
Bai Jingfeng, Yang Jie. Study on spatial distribution of virtual water of main crops and water resources allocation in Henan Province [J]. Areal Research and Development, 2012, 31(3):167-171. (in Chinese)
- 4 张竟竟. 河南省农业水旱灾害风险评估与时空分布特征[J]. 农业工程学报, 2012, 28(18):98-106.
Zhang Jingjing. Risk assessment and spatial-temporal distribution characteristics of flood and drought disasters in Henan Province [J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(18):98-106. (in Chinese)
- 5 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. Research on the change trend of crop water requirement in the middle reaches of Heihe River Basin in the recent 43 years [J]. Resources Science, 2012, 34(3):409-417. (in Chinese)
- 6 王卫光,孙凤朝,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.
Wang Weiguang, Sun Fengchao, Peng Shizhang, et al. Simulation of response of water requirement for rice irrigation to climate change [J]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(14):90-98. (in Chinese)
- 7 王宏,谭国明,孙庆川,等. 承德春玉米需水量变化及其与气象因子的关系[J]. 气象与环境学报, 2012, 28(4):69-72.
Wang Hong, Tan Guoming, Sun Qingchuan, et al. Variation of spring corn water requirement and its relationship with the meteorological factors in Chengde, Hebei Province [J]. Journal of Meteorology and Environment, 2012, 28(4):69-72. (in Chinese)
- 8 Hossein Tabari, Ozgur Kisi, Azadeh Ezani, et al. SVM, ANFIS, regression and climate based models for reference evapotranspiration modeling using limited climatic data in a semi-arid highland environment [J]. Journal of Hydrology, 2012, 444:78-89.
- 9 Temba Nkomozepi, Sang-Ok Chung. Assessing the trends and uncertainty of maize net irrigation water requirement estimated from climate change projections for Zimbabwe [J]. Agricultural Water Management, 2012(111):60-67.
- 10 周迎平,胡正华,崔海玲,等. 1971—2010 年气候变化对河南省主要作物需水量的影响[J]. 南京信息工程大学学报:自然科学版, 2013, 5(6):515-521.
Zhou Yingping, Hu Zhenghua, Cui Hailing, et al. Effect of climate change on main crop water requirements in Henan Province during 1971—2010[J]. Journal of Nanjing University of Information Science and Technology: Natural Science Edition, 2013, 5(6):515-521. (in Chinese)
- 11 阮本清,韩宇平,蒋仁飞. 灌区生态用水研究[M]. 北京:中国水利水电出版社, 2007:34-35.
- 12 马黎华,康绍忠,栗晓玲,等. 农作区净灌溉需水量模拟及不确定性分析[J]. 农业工程学报, 2012, 28(8):11-18.
Ma Lihua, Kang Shaozhong, Su Xiaoling, et al. Simulation and uncertainty analysis of net irrigation requirement in agricultural area[J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(8):11-18. (in Chinese)
- 13 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 irrigation water requirement and irrigation requirement index for cotton of Hebei Province [J]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(19):98-104. (in Chinese)
- 14 刘战东,段爱旺,肖俊夫,等. 旱作物生育期有效降水量计算模式研究进展[J]. 灌溉排水学报, 2007, 26(3):27-34.
Liu Zhandong, Duan Aiwang, Xiao Junfu, et al. Research progress on calculation methods of effective rainfall in growing period on dry crop[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2007, 26(3):27-34. (in Chinese)
- 15 Smith M. CROPWAT: a computer program for irrigation planning and management [M]. Rome: Food and Agriculture Organization, 1992:20-21.
- 16 Doll P, Siebert S. Global modeling of irrigation water requirements [M]. Water Resources Research, 2002, 38(4):1-10.
- 17 申双和,盛琼. 45 年来中国蒸发皿蒸发量的变化特征及其成因[J]. 气象学报, 2008, 66(3):452-460.

- Shen Shuanghe, Sheng Qiong. Changes in pan evaporation and its cause in China in the last 45 years [J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 2008, 66(3):452–460. (in Chinese)
- 18 栾兆擎, 章光新, 邓伟, 等. 松嫩平原 50 年来气温及降水变化分析[J]. *中国农业气象*, 2007, 28(4):355–358.
Luan Zhaoqing, Zhang Guangxin, Deng Wei, et al. Studies on changes of air temperature and precipitation for last 50 years in Songnen Plain [J]. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 2007, 28(4):355–358. (in Chinese)
- 19 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.
Wei Qingshun, Sun Xihuan, Liu Zailun. Path analysis of effects of diffuser geometric parameters on performance of submersible pump [J]. *Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering*, 2014, 32(3):202–207. (in Chinese)
- 20 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.
Feng Yu, Cui Ningbo, Wei Xinping, et al. Temporal-spatial distribution characteristics and causes analysis of reference crop evapotranspiration in hilly area of central Sichuan [J]. *Transactions of the CSAE*, 2014, 30(14):78–86. (in Chinese)
- 21 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.
Cai Jiabing, Liu Yu, Xu Di, et al. Sensitivity analysis on water deficit indicator of winter wheat based on path analysis theory [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2008, 39(1):83–90. (in Chinese)
- 22 杨琪, 张勃, 尹海霞, 等. 甘肃河东地区近 50 年小麦需水量变化趋势及影响因子[J]. *生态学杂志*, 2013, 32(11):3074–3081.
Yang Qi, Zhang Bo, Yin Haixia, et al. Change trend of wheat water requirement and related affecting factors in Hedong Region of Gansu Province, Northwest China in recent 50 years [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2013, 32(11):3074–3081. (in Chinese)
- 23 马志红, 许蓬蓬, 朱自玺, 等. 河南省冬小麦灌溉需水量及年型特征[J]. *气象与环境科学*, 2009, 32(4):60–64.
Ma Zhihong, Xu Pengpeng, Zhu Zixi, et al. Irrigation water requirement for winter wheat and its year pattern characteristics in Henan Province [J]. *Meteorological and Environmental Sciences*, 2009, 32(4):60–64. (in Chinese)
- 24 姬兴杰, 朱业玉, 顾万龙. 河南省参考作物蒸散量变化特征及其气候影响分析[J]. *中国农业气象*, 2013, 34(1):14–22.
Ji Xingjie, Zhu Yeyu, Gu Wanlong. Analysis on trends in annual reference crop evapotranspiration and its impact climatic factors in Henan Province during 1971 to 2010 [J]. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 2013, 34(1):14–22. (in Chinese)
- 25 McVicar T R, Niel T G V, Li L T, et al. Spatially distributing monthly reference evapotranspiration and pan evaporation considering topographic influences [J]. *Journal of Hydrology*, 2007, 338:196–220.
- 26 倪广恒, 李新红, 丛振涛, 等. 中国参考作物腾发量时空变化特性分析[J]. *农业工程学报*, 2006, 22(5):1–4.
Ni Guangheng, Li Xinhong, Cong Zhentao, et al. Temporal and spatial characteristics of reference evapotranspiration in China [J]. *Transactions of the CSAE*, 2006, 22(5):1–4. (in Chinese)
- 27 刘晓英, 李玉中, 郝卫平. 华北主要作物需水量近 50 年变化趋势及原因[J]. *农业工程学报*, 2005, 21(10):155–159.
Liu Xiaoying, Li Yuzhong, Hao Weiping. Trend and causes of water requirement of main crops in North China in recent 50 years [J]. *Transactions of the CSAE*, 2005, 21(10):155–159. (in Chinese)
- 28 宋妮, 孙景生, 王景雷, 等. 河南省冬小麦需水量的时空变化及影响因素[J]. *应用生态学报*, 2014, 25(6):1693–1700.
Song Ni, Sun Jingsheng, Wang Jinglei, et al. Temporal and spatial variation of water requirement of winter wheat and its influencing factors in Henan Province [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2014, 25(6):1693–1700. (in Chinese)

(上接第 177 页)

- 8 吕子剑, 曹文仲, 刘今. 不同粒径固体颗粒的悬浮速度计算及测试[J]. *化学工程*, 1997, 25(5):42–46.
Lü Zijian, Cao Wenzhong, Liu Jin. Research of suspension of particle in reactor [J]. *Chemical Engineering*, 1997, 25(5):42–46. (in Chinese)
- 9 Stout J E, Fryrear D W. Performance of a wind blown-particle sample [J]. *Transactions of the ASAE*, 1989, 32(6):2041–2045.
- 10 荣姣凤, 高焕文, 李胜. 风蚀集沙仪的等动力性试验研究[J]. *中国水土保持*, 2004(5):17–19.
Rong Jiaofeng, Gao Huanwen, Li Sheng. Experimental and study on equidynamic of sand collector in wind erosion [J]. *Soil and Water Conservation in China*, 2004(5):17–19. (in Chinese)
- 11 朱朝云, 丁国栋, 杨明远. 风沙物理学 [M]. 北京: 中国林业出版社, 1992.
- 12 胡杨. 集沙仪的性能实验 [J]. *世界沙漠研究*, 1994(1):42–46.
Hu Yang. Performance experiment on sand sampler [J]. *World Desert Research*, 1994(1):42–46. (in Chinese)
- 13 段学友. 可移动式风蚀风洞流空气动力学特性的测试与评价 [D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2005.
Duan Xueyou. Thetest and evaluation of characteristic of aerodynamics on portable erosion wind tunnel [D]. Huhhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2005. (in Chinese)
- 14 Cornelis W M, Gabriels D. A simple low-cost sand catcher for wind-tunnel simulations [J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2003, 28(9):1033–1041.
- 15 Goossens D, Offer Z, London G. Wind tunnel and field calibration of five aeolian sand traps [J]. *Geomorphology*, 2000, 35(3–4):233–252.