

河南省冬小麦需水量的时空变化及影响因素^{*}

宋 妮 孙景生 王景雷^{**} 陈智芳 刘祖贵

(中国农业科学院农田灌溉研究所/农业部作物需水与调控重点实验室, 河南新乡 453002)

摘 要 基于河南省 17 个气象监测站点 1961—2012 年逐旬气象数据, 采用 FAO 推荐的 Penman-Monteith 公式计算参考作物需水量, 结合“全国灌溉试验资料数据库”中冬小麦生育期、作物系数等数据计算冬小麦生育期需水量, 利用时间序列分析法和灰色关联分析法, 分析河南省冬小麦需水量近 51 年来的时空分布特征、变化规律及其主要影响因素。结果表明: 1961—2011 年, 河南省冬小麦平均需水量在 345 ~ 492 mm, 卢氏站冬小麦平均需水量最低, 孟津站最高。大部分站点 1980—1989 年冬小麦平均需水量最低, 1961—1969 年冬小麦平均需水量最高。17 个站点中, 新乡、栾川、开封、西峡、南阳、信阳、固始 7 站冬小麦需水量随年份呈上升趋势, 其余 10 个站点需水量均呈下降趋势; 豫北需水量高于豫南, 豫西地区需水量跨度较大。河南省 17 站冬小麦生育期日平均高温、日平均低温均随年份呈上升趋势, 生育期日平均风速、日平均相对湿度、日照时数基本呈下降趋势。河南省冬小麦生育期日平均高温、日照时数是影响冬小麦需水量的主要因素, 日平均相对湿度对其影响最小。

关键词 河南省 冬小麦 需水量 气候变化 影响因素

文章编号 1001-9332(2014)06-1693-08 **中图分类号** S161 **文献标识码** A

Temporal and spatial variation of water requirement of winter wheat and its influencing factors in Henan Province, China. SONG Ni, SUN Jing-sheng, WANG Jing-lei, CHEN Zhi-fang, LIU Zu-gui (Farmland Irrigation Research Institute, Chinese Academy of Agricultural Sciences/Ministry of Agriculture Key Laboratory of Crop Water Requirement and Regulation, Xinxiang 453002, Henan, China). -Chin. J. Appl. Ecol., 2014, 25(6): 1693–1700.

Abstract: Based on mean meteorological data of ten days in 17 observation stations from 1961 to 2012, the reference crop evapotranspiration was computed using Penman-Monteith formula recommended by FAO. The water requirement of winter wheat in Henan Province was calculated by adopting crop coefficients and the growth stage of winter wheat from the “National Irrigation Experiment Database”, and the temporal and spatial distribution, variation and affecting factors in recent 51 years were analyzed by means of time-series analysis and gray relational grade analysis. The results showed that the average water requirement of winter wheat was 345–492 mm in Henan Province from 1961 to 2011, and it was lowest at Lushi station and highest at Mengjin station. The average water requirement of winter wheat was lowest from 1980 to 1989 and highest from 1961 to 1969 at most stations. The water requirement of winter wheat showed a tendency to increase with years at the 7 stations (Xinxiang, Luanchuan, Kaifeng, Xixia, Nanyang, Xinyang and Gushi), while it indicated a tendency to decline in the other 10 stations. The water requirement of winter wheat in North Henan was higher than in South Henan, and had a high span variation in West Henan. During the growing period of winter wheat, the average daily maximum and minimum temperatures showed a tendency to increase with years, while the average daily wind speed and relative humidity, and the sunshine hours had a tendency to decline. In Henan Province, the water requirement of winter wheat was mainly affected by the average daily maximum temperature and the sunshine hours, and least influenced by the average daily relative humidity.

Key words: Henan Province; winter wheat; water requirement; climate change; influencing factor.

^{*} 国家高新技术研究发展计划项目(2011AA100502)、公益性行业(农业)科研专项(201203077)、国家自然科学基金项目(51079154)、现代农业小麦产业技术体系建设专(CARS-3-1-30)和中央级公益性科研院所基本科研业务费专项(0032012032)资助。

^{**} 通讯作者。E-mail: firwjl@126.com

2013-11-11 收稿, 2014-03-24 接受。

作物需水量的估算和预测在农田水分管理、灌溉制度的制定等农业生产实践中发挥着关键作用,是一个地区或国家节水工程规划与设计的基础资料,也是水资源开发、利用与管理,农作物种植区划与布局,农作物生产运筹等工作的重要依据. 了解其历史变化对于掌握未来农业用水走势并据此做出正确决策至关重要^[1].

受自然和人类活动的共同影响,地球气候系统正在经历以变暖为主要特征的全球气候变化^[2]. Hulme 等^[3]认为,温度升高会使潜在蒸发增加. 但近 50 年来全球实际蒸发量除个别地区升高外,大部分地区呈下降趋势^[4]. 例如,我国各区域参考作物需水量呈不同程度的下降趋势^[5],华北平原、西北五省、松嫩平原年均参考作物需水量呈整体下降趋势^[6-8],黄河流域潜在蒸散量总体呈下降-稳定-上升趋势^[9],长江流域上游区域呈增加趋势、中游区域呈下降趋势^[10],黄土高原地区整体变化趋势不明显^[11]. 孙爽等^[12]对中国 356 个站点 1961—2010 年冬小麦需水量数据分析后认为,冬小麦全生育期需水量近 50 年来呈下降趋势. 杨晓琳等^[13]对黄淮海 50 个气象站点 1960—2009 年冬小麦需水量的时空变化进行分析,认为冬小麦需水量呈下降趋势,主要由于太阳辐射量下降所致. 曹红霞等^[14]对关中地区 30 个气象站 1961—2001 年冬小麦需水量年际变化趋势分析表明,17 个站点呈增加趋势,13 个站点呈减少趋势,认为关中地区需水量无一致变化趋势,对比气象因子与需水量相关系数的大小认为,影响关中地区冬小麦需水量的气象因子顺序为:相对湿度>最高气温>日照时数>降水量>平均气温>风速. 刘晓英和林而达^[15]研究了气候变暖对我国华北地区主要作物需水量的影响,认为气候变暖对冬小麦需水量的影响最大,棉花次之,夏玉米最小.

河南省是中国小麦生产大省,小麦产量连续多年占全国小麦总产的四分之一强. 据统计,2011 年河南省冬小麦播种面积占全国总播种面积的 21.9%,产量占 26.6%,均居全国首位^[16]. 近年来,河南省频遭暖冬、早春等异常气候,气候已发生了明显变化,对冬小麦生产造成一定影响^[17]. 因此,本文利用河南省 17 个代表站点的气象数据和灌溉试验数据,分析 1961—2012 年冬小麦需水量的变化趋势和空间分布,以及河南省冬小麦需水量各年代间的变化特征,旨在为河南省农业水资源的优化配置提供基础数据,并为该省小麦生产如何应对气候变化提供决策依据.

1 材料与方法

1.1 数据来源

本研究采用的河南省 17 个地面观测站 1961—2012 年逐旬气象资料均来自国家气象中心,包括最高气温(℃)、最低气温(℃)、10 m 高处平均风速($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)、相对湿度(%)、日照时数(h). 冬小麦生育期、作物系数来源于“全国灌溉试验资料数据库”. 空间图形数据主要参照 1:400 万的全国政区图、水系图等(中国资源与环境数据光盘,中国科学院地理研究所资料与环境信息系统国家重点实验室 1996 年 6 月出版).

1.2 研究方法

1.2.1 冬小麦需水量 冬小麦需水量(ET_c)计算公式如下:

$$ET_c = ET_0 \times K_c$$

式中: ET_0 为参考作物需水量,采用 FAO56 推荐的 Penman-Monteith 公式^[18]计算; K_c 为作物系数^[19].

1.2.2 时间序列分析法 采用时间序列分析法分析冬小麦需水量和气象要素的年际变化趋势,主要指标为气候趋势系数和气候倾向率^[20-22].

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:

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

式中: n 为年数; x_i 为第 i 年要素值; \bar{x} 为样本均值; $\bar{t} = (n+1)/2$. 通常使用 t 检验法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,表示该要素气候趋势明显,存在增加(减少)趋势.

将冬小麦需水量或气象要素(x)的长期变化趋势采用线性回归方程分析,其公式为:

$$\bar{X} = a_0 + a_1 t, \quad a_1 = d\bar{X}/dt \quad (2)$$

式中: t 为年份序列号($t=1,2,\dots,n$); a_0 为常数; a_1 为回归系数,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. $10a_1$ 称为气候倾向率,表示要素每 10 年的变化率.

1.2.3 空间分布图绘制 采用 ArcGIS 软件中地理统计分析的普通克里格(Ordinary Kriging)方法绘制河南省 17 个站点不同年代的冬小麦平均需水量空间分布图.

1.2.4 灰色关联分析法 灰色关联分析法是采用关

联度来量化研究系统内各因子的相互联系、相互影响、相互作用的一种方法,近年来广泛应用于资源环境^[23]、品种筛选^[24]、农业气象^[25]等领域,在作物潜在蒸散发方面也有所涉及^[10,26].其计算过程如下:

1)原始数据标准化:

$$x(k) = [x(k) - \bar{x}(k)] / \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{k=1}^n [x(k) - \bar{x}(k)]^2}$$

(3)

式中: $x(k)$ 为计算数列; $\bar{x}(k)$ 为数列均值; $n=51$.冬小麦全生育期需水量为参考数列,记为 $x_0(k)$,日平均高温、日平均低温、日平均风速、日平均相对湿度、日照时数(以上气象数据均为冬小麦生育期数据,下同)为比较数列,分别记为 $x_1(k)$ 、 $x_2(k)$ 、 $x_3(k)$ 、 $x_4(k)$ 、 $x_5(k)$.

2)计算关联系数:

$$\xi_i(k) = [\min_i \min_k |x_0(k) - x_i(k)| + P \max_i \max_k |x_0(k) - x_i(k)|] / [|x_0(k) - x_i(k)| + P \max_i \max_k |x_0(k) - x_i(k)|]$$

(4)

式中: $\min_i \min_k |x_0(k) - x_i(k)|$ 为两级的最小差,第一级最小差 $\min_k |x_0(k) - x_i(k)|$ 指在绝对差 $|x_0(k) - x_i(k)|$ 中按不同 k 值挑选其中最小者,第二级最小差 $\min_i (\min_k |x_0(k) - x_i(k)|)$ 是在 $\min_k |x_0(k) - x_i(k)|$ 中挑选其中最小者; $\max_i \max_k |x_0(k) - x_i(k)|$ 为两级的最大差,意义同最小差相似,只是挑选最大者; P 为分辨系数,其值在0~1,一般取0.5.

3)计算关联度:

$$r_i = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \xi_i(k)$$

(5)

式中: r_i 为气象因子序列对需水量序列的关联度; $\xi_i(k)$ 为根据式(4)计算的气象因子序列与需水量序列的关联系数.

本文采用灰色关联分析法分别计算河南省17站冬小麦生育期需水量与5个气象因子的关联度.

2 结果与分析

2.1 冬小麦需水量的年际变化趋势

从表1可以看出,研究区大部分站点1980—1989年冬小麦平均需水量最低,1961—1969年冬小麦平均需水量最高.这是由于大部分站点1980s日平均高温较低、日相对湿度较高,而1960s各站点日照时数和平均风速较高所致.17个站点中,新乡、栾川、开封、西峡、南阳、信阳、固始7站冬小麦需水量随年份呈上升趋势.其余10个站点需水量均呈下降趋势,其中,信阳站冬小麦需水量随年份呈极显著上升趋势,上升速率最高(气候倾向率12.5 mm·10 a⁻¹);西华站冬小麦需水量随年份呈极显著下降趋势,下降速率最高(气候倾向率-12.5 mm·10 a⁻¹).宝丰站次之(气候倾向率-12.1 mm·10 a⁻¹).这可能是由于在所有站点中,信阳站平均风速呈上升趋势、相对湿度呈极显著下降趋势,西华站平均风速呈

表1 河南省冬小麦需水量年代均值及年际变化趋势
Table 1 Decade average and yearly change trends of winter wheat water requirement in Henan Province

站点 Station	需水量均值 Average water requirement (mm)							气候倾向率 Climatic trend rate (mm·10 a ⁻¹)	气候趋势系数 Climatic trend coefficient
	1961—1969	1970—1979	1980—1989	1990—1999	2000—2009	2010—2011	1961—2011		
安阳 Anyang	507.3	504.0	458.8	490.9	467.1	450.0	483.8	-10.2	-0.32 *
新乡 Xinxiang	494.8	460.8	436.7	459.4	486.8	493.6	468.2	0.6	0.02
三门峡 Sanmenxia	490.0	491.2	450.1	462.5	449.8	452.9	467.7	-10.3	-0.41 **
卢氏 Lushi	354.8	350.8	328.6	343.1	350.5	357.2	345.8	-0.5	-0.03
孟津 Mengjin	516.4	480.2	475.3	492.9	497.5	511.6	492.8	-1.1	-0.03
栾川 Luanchuan	356.7	355.0	335.2	358.2	371.5	414.3	357.6	6.0	0.29 *
郑州 Zhengzhou	478.9	462.4	438.8	426.4	454.2	479.8	452.7	-5.9	-0.20
许昌 Xuchang	439.3	393.1	392.0	423.8	410.9	394.5	410.6	-2.8	-0.10
开封 Kaifeng	455.4	446.8	420.0	418.8	463.0	474.2	441.8	0.6	0.02
西峡 Xixia	384.5	388.9	362.3	400.7	409.7	420.2	390.5	6.9	0.26
南阳 Nanyang	388.8	366.6	352.5	377.6	372.1	408.6	372.6	0.3	0.02
宝丰 Baofeng	467.2	457.2	420.9	425.9	418.3	421.3	436.7	-12.1	-0.38 **
西华 Xihua	421.4	406.3	387.5	376.6	369.5	377.8	391.1	-12.5	-0.47 **
驻马店 Zhumadian	396.8	380.7	372.2	382.0	383.2	384.1	382.8	-1.9	-0.08
信阳 Xinyang	365.1	361.3	396.7	413.6	405.0	421.2	390.1	12.5	0.52 **
商丘 Shangqiu	407.9	395.1	357.5	365.4	365.8	391.5	378.3	-8.9	-0.33 *
固始 Gushi	382.1	390.4	382.9	402.8	393.5	399.8	390.9	3.5	0.17

表中年份为冬小麦播种年 The year was the sowing year for winter wheat in table. * P<0.05; ** P<0.01. 下同 The same below.

极显著下降趋势,宝丰站相对湿度呈上升趋势,风速与需水量呈正相关,湿度与需水量呈负相关,导致各站点需水量的极值表现. 1961—2011 年,卢氏站冬小麦平均需水量最低,孟津站最高,可能与卢氏站平均风速最低、孟津站相对湿度最低有关. 不同年代对比中,除 1970s 安阳站冬小麦平均需水量较高外,其余年代均为孟津站最高,卢氏站冬小麦平均需水量在所有年代中均最低. 这可能与 1970s 安阳站日照时数最高,孟津站 1960s、1980s、2000s 相对湿度最低,1990s、2010s 平均风速均最高,卢氏站各年代平均风速均最低有关.

2.2 冬小麦需水量的空间分布特征

从图 1 可以看出,河南省冬小麦多年平均需水量在 345 ~ 492 mm,空间分布特征明显,自南向北逐渐增大,安阳、孟津需水量最高,卢氏、栾川、南阳需水量最低,豫西地区需水量跨度较大. 对比不同年代空间分布图可见,孟津站除 1970s 需水量略有下降外,其他年代需水量最高,可能与 1970s 孟津站相对湿度明显高于其他年代有关. 安阳站除 1980s、2000s 需水量略有下降外,其他年代需水量均大于 470 mm. 分析发现,1980s 该区平均风速明显低于其他年代,日照时数明显低于前两个年代;2000s 安阳站

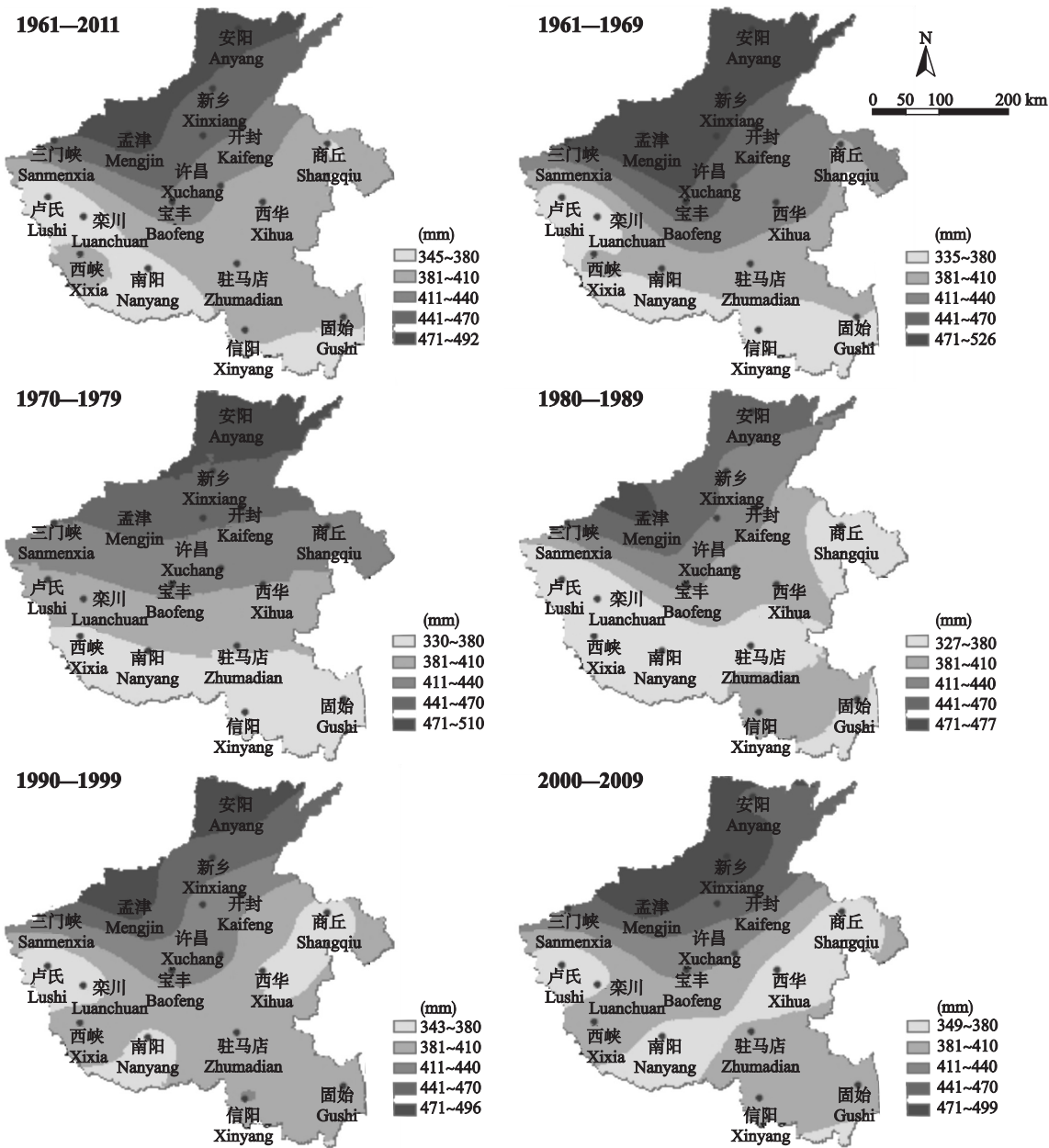


图 1 河南省冬小麦需水量的空间分布
Fig. 1 Spatial distribution of water requirement of winter wheat in Henan Province.

日照时数为所有年代最低,湿度明显高于其他年代. 新乡站冬小麦需水量随年代呈先下降后上升趋势, 1980s 需水量最低,与各年代平均风速变化相似,这与下文风速是影响新乡冬小麦需水量变化的主要影响因子的分析一致. 河南省各年代冬小麦空间分布图基本呈自南向北逐渐增大趋势,豫中地区各年代间差异较小;豫南地区虽然一直处于低值区,但年代间变化较大. 1970s 河南省冬小麦东西方向需水量间差异较小,其余年代差异较大;1990s、2000s 豫南地区需水量空间分布与其他年代稍有差异. 对比不同年代气象要素空间分布(图略)可见,1970s 河南省冬小麦生育期日照时数空间分布与其他年代不同,其他年代均为自南向北增加,而 1970s 为自西向东增加;1990s、2000s 河南省冬小麦生育期高温空间分布呈自南向北逐渐降低趋势,其他年代呈从中间向两边逐渐降低趋势,因此,1970s、1990s、2000s 河南省冬小麦需水量的变化可能与生育期高温、日照时数的变化有关. 1960s 河南省冬小麦需水量最高达 526 mm,且高值区面积明显大于其他年代(表 2),这与 1960s 新乡、郑州站需水量较高密切相关;1980s 河南省冬小麦需水量在 327 ~ 477 mm,相比其他年代最低,低值区面积明显大于其他年代,高值区面积明显小于其他年代(表 2). 分析可见,1980s 河南省大部分站点最高温度低于其他年代,相对湿度高于其他年代,同时,豫北安阳、新乡、开封等站点风速较低引起需水量下降,各因素共同作用导致

表 2 河南省冬小麦主要年代分级需水量面积统计
Table 2 Area statistics of winter wheat water requirement in Henan Province in main decades (km²)

需水量 Water requirement (mm)	年代 Decade				
	1961— 1969	1970— 1979	1980— 1989	1990— 1999	2000— 2009
≤380	35719	42215	65958	26850	40488
381 ~ 410	37337	37748	46662	78183	64124
411 ~ 440	32469	43729	24444	24068	16933
441 ~ 470	18843	25987	25390	21712	22036
≥471	41242	15931	3156	14797	22029

1980s 河南省需水量明显低于其他年代,低值区面积较大,高值区面积较小.

2.3 河南省冬小麦生育期主要气象因子年际变化趋势

需水量受多种因素的影响. 由于本文主要分析气候变化对作物需水量的影响,因此需首先分析各主要因子的变化. 为此计算了河南省冬小麦生育期各气象因子 1961—2011 年气候倾向率和气候倾向系数(表 3).

从表 3 可以看出,1961—2011 年,河南省 17 站冬小麦生育期日平均高温、日平均低温均随年份呈上升趋势,其中呈显著上升趋势的站点分别为 6、1 个,呈极显著上升趋势的站点分别为 8、15 个;所有站点中,卢氏、栾川站点日平均高温、开封站点日平均低温气候倾向率最高,分别为 0.36、0.60 ℃ · 10⁻¹,新乡、开封、南阳、西华站点日平均低温

表 3 河南省冬小麦生育期气象因子年际变化趋势
Table 3 Yearly change trends of meteorological factors during the growing period of winter wheat in Henan Province

站点 Station	日均高温 Daily average maximum temperature		日均低温 Daily average minimum temperature		日均风速 Daily average wind speed		日均相对湿度 Daily average relative humidity		生育期日照时数 Sunshine hours at growth stage	
	Tr	Tc	Tr	Tc	Tr	Tc	Tr	Tc	Tr	Tc
安阳 Anyang	0.05	0.10	0.27	0.45 **	-0.07	-0.24	0.20	0.07	-112.52	-0.77 **
新乡 Xinxiang	0.14	0.28 *	0.49	0.81 **	-0.16	-0.48 **	-1.04	-0.34 *	-51.26	-0.54 **
三门峡 Sanmenxia	0.30	0.50 **	0.26	0.60 **	-0.27	-0.88 **	-0.29	-0.10	-41.65	-0.45 **
卢氏 Lushi	0.36	0.53 **	0.12	0.32 *	-0.17	-0.85 **	-0.79	-0.29 *	2.21	0.02
孟津 Mengjin	0.19	0.32 *	0.47	0.76 **	-0.16	-0.62 **	-0.64	-0.17	-19.08	-0.22
栾川 Luanchuan	0.36	0.57 **	0.10	0.26	-0.04	-0.20	-0.41	-0.14	22.30	0.28 *
郑州 Zhengzhou	0.26	0.45 **	0.54	0.77 **	-0.30	-0.87 **	-1.37	-0.37 **	-69.49	-0.69 **
许昌 Xuchang	0.10	0.18	0.23	0.41 **	-0.07	-0.18	-0.19	-0.05	-51.68	-0.52 **
开封 Kaifeng	0.16	0.28 *	0.60	0.84 **	-0.28	-0.69 **	-1.49	-0.38 **	-42.34	-0.43 **
西峡 Xixia	0.27	0.41 **	0.25	0.61 **	-0.01	-0.05	-0.70	-0.21	2.33	0.03
南阳 Nanyang	0.17	0.29 *	0.48	0.81 **	-0.20	-0.71 **	-0.99	-0.33 *	-45.10	-0.51 **
宝丰 Baofeng	0.15	0.26	0.14	0.39 **	-0.21	-0.77 **	0.27	0.08	-76.49	-0.68 **
西华 Xihua	0.15	0.28 *	0.53	0.84 **	-0.41	-0.90 **	-0.54	-0.16	-52.57	-0.58 **
驻马店 Zhumadian	0.21	0.36 **	0.43	0.64 **	-0.26	-0.77 **	-1.08	-0.31 *	-30.59	-0.37 **
信阳 Xinyang	0.23	0.40 **	0.33	0.70 **	0.06	0.25	-1.75	-0.61 **	-48.96	-0.55 **
商丘 Shangqiu	0.15	0.29 *	0.40	0.74 **	-0.31	-0.83 **	-0.50	-0.15	-83.97	-0.67 **
固始 Gushi	0.29	0.50 **	0.30	0.58 **	-0.29	-0.82 **	-1.10	-0.43 **	-24.66	-0.31 *

Tr: 倾向率 Trend rate (℃ · 10⁻¹); Tc: 倾向系数 Trend coefficient.

气候倾向系数均超过 $0.8\text{ }^{\circ}\text{C}$,表示该 4 站日平均低温与年份有很强的线性相关性. 1961—2011 年,河南省 17 站中冬小麦生育期日平均风速、日平均相对湿度、生育期日照时数均随年份呈下降趋势的站点分别为 16、15、14 站,其中呈显著下降趋势的站点分别为 0、4、1 个,呈极显著下降趋势的站点分别为 12、4、12 个;所有站点中,西华站点日平均风速、信阳站点日平均相对湿度、安阳站点生育期日照时数气候倾向率最高,每 10 a 分别下降 $0.41\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 、 1.8% 、 112.52 h ,三门峡、卢氏、郑州、西华、商丘、固始站点日平均风速气候倾向系数均超过 $0.8\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,表示该 6 站日平均风速与年份有很强的线性相关性. 信阳站点日平均风速均随年份呈不显著上升趋势. 不同年代对比发现,大部分站点均为 1960s 日平均风速最高,而许昌、西峡、信阳站点 1990s 日平均风速最高,且信阳站点 1980s、1990s、2000s 日平均风速均高于 1960s、1970s,导致 1961—2011 年信阳站点日平均风速随年份呈上升趋势;安阳、宝丰站点日平均相对湿度均随年份呈不显著上升趋势,不同年代对比发现,安阳站点 2000s 日平均相对湿度明显高于其他年代,宝丰站点 1960s 日平均相对湿度最低,其他年代间差异较小;卢氏、栾川、西峡站点冬小麦生育期日照时数均随年份呈上升趋势,其中栾川呈显著上升趋势,不同年代对比发现,大部分站点 1960s 日照时数最高,2000s 最低,栾川站点与之相反,1960s 最低,2000s 最高,卢氏站点 1990s 日照时数高于其他年代,西峡站点虽然 1960s 日照时数高于其他年代,但 1990s、2000s 日照时数均高于 1970s、1980s.

2.4 影响河南省冬小麦需水量的主要气象因子

气温、相对湿度、风速、日照时数共同影响作物需水量的变化. 除相对湿度外,其余 3 个因子均与需水量呈正相关,即气温的上升和相对湿度的下降将促使作物需水量上升,平均风速和日照时数的下降则导致作物需水量下降^[27]. 从表 4 可以看出,新乡、孟津等 9 站日平均高温为第一影响因子,安阳、三门峡等 8 站日照时数为第一影响因子,有 11 站第二影响因子为平均高温或日照时数,表明冬小麦生育期日平均高温、日照时数是影响冬小麦需水量的主要因素. 除西华站点日平均低温为第五影响因子外,其他站点均为日平均相对湿度为最后影响因子. 大部分站点日平均风速为第三影响因子,个别站点日平均风速的影响甚至超过日平均高温、日照时数,如安阳、三门峡、宝丰、西华等站点日平均风速的影响超

表 4 河南省冬小麦生育期需水量与主要气象因子的关联度
Table 4 Correlation degree of winter wheat water requirement and the major meteorological factors in Henan Province

站点 Station	日均高温 Daily average maximum temperature	日均低温 Daily average minimum temperature	日均相对 湿度 Daily average relative humidity	日均风速 Daily average wind speed	生育期 日照时数 Sunshine hours at growth stage
安阳 Anyang	0.786	0.705	0.655	0.801	0.805
新乡 Xinxiang	0.817	0.742	0.660	0.785	0.768
三门峡 Sanmenxia	0.713	0.677	0.633	0.745	0.853
卢氏 Lushi	0.783	0.703	0.654	0.724	0.829
孟津 Mengjin	0.824	0.733	0.647	0.778	0.805
栾川 Luanchuan	0.844	0.815	0.735	0.817	0.845
郑州 Zhengzhou	0.791	0.727	0.691	0.779	0.789
许昌 Xuchang	0.802	0.691	0.650	0.729	0.770
开封 Kaifeng	0.834	0.755	0.683	0.764	0.776
西峡 Xixia	0.884	0.776	0.699	0.805	0.856
南阳 Nanyang	0.874	0.766	0.708	0.780	0.841
宝丰 Baofeng	0.783	0.666	0.623	0.796	0.803
西华 Xihua	0.768	0.669	0.684	0.780	0.848
驻马店 Zhumadian	0.834	0.717	0.675	0.747	0.829
信阳 Xinyang	0.846	0.812	0.704	0.801	0.777
商丘 Shangqiu	0.802	0.689	0.675	0.780	0.859
固始 Gushi	0.823	0.753	0.710	0.732	0.841

过日平均高温,新乡站点日平均风速的影响超过日照时数.

3 讨 论

1961—2011 年,河南省冬小麦多年平均需水量在 345 ~ 492 mm,17 站中卢氏站冬小麦平均需水量最低,孟津站最高. 大部分站点 1980—1989 年冬小麦平均需水量最低,1961—1969 年冬小麦平均需水量最高. 17 个站点中,新乡、栾川、开封、西峡、南阳、信阳、固始 7 站冬小麦需水量随年份呈上升趋势,其余 10 个站点均呈下降趋势. 其中,信阳站冬小麦需水量随年份呈极显著上升趋势,上升速率最高(气候倾向率 $12.5\text{ mm}\cdot10\text{ a}^{-1}$);西华站冬小麦需水量随年份呈极显著下降趋势,下降速率最高(气候倾向率 $-12.5\text{ mm}\cdot10\text{ a}^{-1}$). 这与孙爽等^[12]的研究稍有差异. 孙爽等^[12]绘制的冬小麦全生育期需水量变化趋势空间分布图中,河南省站点中除与陕西、湖北毗邻一带站点呈上升趋势外,其余均为下降趋势. 这是由于其研究成果是基于 1961—2010 年气象数据,本文在采用同样年份数据后发现,新乡、开封、南阳站冬小麦需水量随年份呈下降趋势,气候倾向率分别为 -0.6 、 -1.0 和 $-1.5\text{ mm}\cdot10\text{ a}^{-1}$. 表明需水量年际趋势仅能代表数据采用年份的变化趋势,利用它

对未来需水量变化进行预测时准确性较差;若进行未来某年份需水量预测,利用天气预报或某一气候模式比较合适。

河南省冬小麦生育期日平均高温、低温均呈上升趋势,大部分站点日平均风速、日平均相对湿度、日照时数呈下降趋势。其中,信阳站平均风速,安阳、宝丰站平均相对湿度,卢氏、栾川、西峡站日照时数呈上升趋势^[28]。这同以往研究认为近50年来全国平均气温呈上升趋势^[29],平均日照时数、平均风速等气候要素均呈显著下降趋势,日照时数减少最明显的地区为华北和华东^[30]一致。众多学者在考察了所有的可能因素后认为,最有可能的原因是人类活动产生的气溶胶及其他空气污染物,改变了大气尤其是云的光学特性^[17]。

河南省气候资源复杂,南部为北亚热带气候,北部为暖温带气候。本研究结果表明,河南省冬小麦多年平均需水量空间分布特征明显,自南向北逐渐增大;豫南年日照时数相对少于豫北^[28],表明日照是影响河南省冬小麦需水量的重要气象因子。豫西地区需水量跨度较大,各年代冬小麦空间分布图基本呈自南向北逐渐增大趋势,豫中地区各年代间差异较小,豫南地区虽然一直处于低值区,但年代间变化较大。1970s河南省冬小麦东西方向需水量间差异较小,其余年代差异较大,1960s河南省冬小麦需水量高达526 mm,且高值区面积明显大于其他年代,1980s河南省冬小麦需水量在327~477 mm,相比其他年代最低,低值区面积明显大于其他年代,高值区面积明显小于其他年代。

作物需水量的变化是各气象因素综合作用的效果,且各因子的贡献存在区域差异。本研究表明,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,其次是风速。姬兴杰等^[31]认为,1971—2010年,风速减小是导致河南省年 ET_0 呈显著减小的主要原因。高歌等^[5]认为,1956—2000年中国大多数地区潜在蒸散量减少的主要原因是日照时数和/或风速的明显减少。刘晓英等^[1]认为,近50年日照与风速的减小是华北作物需水量下降的主要原因。倪广恒等^[32]认为,1976—2000年中国干旱地区、半干旱地区和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。不同的结论可能是由于数据采用时间不同和不同的分析方法所致。

参考文献

[1] Liu X-Y (刘晓英), Li Y-Z (李玉中), Hao W-P (郝

- 卫平). Trend and causes of water requirement of main crops in North China in recent 50 years. *Transactions of the Chinese Society Agricultural Engineering* (农业工程学报), 2005, **21**(10): 155–159 (in Chinese)
- [2] Wang W-G (王伟光), Zheng G-G (郑国光). Annual Report on Actions to Address Climate Change (2010): Challenges in Kancun and China's Actions. Beijing: Social Sciences Academic Press, 2010 (in Chinese)
- [3] Hulme M, Zhao ZC, Jiang T. Recent and future climate change in East Asia. *International Journal of Climatology*, 1994, **14**: 637–658
- [4] Roderick ML, Farquhar GD. The cause of decreased pan evaporation over the past 50 years. *Science*, 2002, **298**: 1410–1411
- [5] Gao G (高歌), Chen D-L (陈德亮), Ren G-Y (任国玉), et al. Trend of potential evapotranspiration over China during 1956–2000. *Geographical Research* (地理研究), 2006, **25**(3): 378–387 (in Chinese)
- [6] Ma J-H (马洁华), Liu Y (刘园), Yang X-G (杨晓光), et al. Characteristics of climate resources under global climate change in the North China Plain. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2010, **30**(14): 3818–3827 (in Chinese)
- [7] Liu X-F (刘宪锋), Pan Y-Z (潘耀忠), Zhang J-S (张锦水), et al. Spatiotemporal variation patterns of potential evapotranspiration in five provinces of Northwest China in 1960–2011. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2013, **24**(9): 2564–2570 (in Chinese)
- [8] Zhang Y-F (张永芳), Deng J-L (邓珺丽), Guan D-X (关德新), et al. Spatiotemporal changes of potential evapotranspiration in Songnen Plain of Northeast China. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2011, **22**(7): 1702–1710 (in Chinese)
- [9] Shi J-G (史建国), Yan C-R (严昌荣), He W-Q (何文清), et al. Study on spatio-temporal change of evapotranspiration in the Yellow River Basin. *Arid Zone Research* (干旱区研究), 2007, **24**(6): 773–778 (in Chinese)
- [10] Hao Z-C (郝振纯), Yang R-R (杨荣榕), Chen X-M (陈新美), et al. Tempo-spatial patterns of the potential evaporation in the Yangtze River catchment for the period 1960–2011. *Journal of Glaciology and Geocryology* (冰川冻土), 2013, **35**(2): 408–419 (in Chinese)
- [11] Wang Y-Q (王幼奇), Fan J (樊军), Shao M-A (邵明安), et al. Analysis of effects of climate change on reference evapotranspiration on the Loess Plateau in recent 50 years. *Transactions of the Chinese Society Agricultural Engineering* (农业工程学报), 2008, **24**(9): 6–10 (in Chinese)
- [12] Sun S (孙爽), Yang X-G (杨晓光), Li K-N (李克南), et al. Analysis of spatial and temporal characteristics of water requirement of winter wheat in China. *Transactions of the Chinese Society Agricultural Engineering* (农业工程学报), 2013, **29**(15): 72–82 (in Chinese)

- [13] Yang X-L (杨晓琳), Song Z-W (宋振伟), Wang H (王 宏), *et al.* Spatio-temporal variations of winter wheat water requirement and climatic causes in Huang-Huai-Hai Farming Region. *Chinese Journal of Eco-Agriculture* (中国生态农业学报), 2012, **20**(3): 356–362 (in Chinese)
- [14] Cao H-X (曹红霞), Su X-L (粟晓玲), Kang S-Z (康绍忠), *et al.* Effect of climate change on main crop water requirements in Guanzhong Region. *Journal of Irrigation and Drainage* (灌溉排水学报), 2008, **27**(4): 6–9 (in Chinese)
- [15] Liu X-Y (刘晓英), Lin E-D (林而达). Impact of climate change on water requirement of main crops in North China. *Journal of Hydraulic Engineering* (水利学报), 2004(2): 77–82 (in Chinese)
- [16] National Bureau of Statistics of China (国家统计局). China Statistical Yearbook. Beijing: China Statistics Press, 2012 (in Chinese)
- [17] Editorial Committee on Climate Change and Crop Yield (气候变化与作物产量编写组). Climate Change and Crop Yield. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 1992 (in Chinese)
- [18] Allen RG, Pereira LS, Raes D, *et al.* Crop Evapotranspiration: Guidelines for Computing Crop Water Requirements. FAO Irrigation and Drainage Paper No. 56. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 1998
- [19] Song N (宋 妮), Sun J-S (孙景生), Wang J-L (王景雷), *et al.* Analysis of difference in crop coefficients based on modified Penman and Penman-Monteith equations. *Transactions of the Chinese Society Agricultural Engineering* (农业工程学报), 2013, **29**(19): 88–97 (in Chinese)
- [20] Feng M-Y (冯敏玉), Wei L (魏 丽), Hu F-X (胡逢喜), *et al.* Analysis on changes of temperature and precipitation in Nanchang in recent 55 years. *Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis* (江西农业大学学报), 2009, **31**(4): 781–784 (in Chinese)
- [21] Luan Z-Q (栾兆擎), Zhang G-X (张光新), Deng W (邓 伟), *et al.* Studies on changes of air temperature and precipitation for last 50 years in Songnen Plain. *Chinese Journal of Agrometeorology* (中国农业气象), 2007, **28**(4): 355–358 (in Chinese)
- [22] Shen S-H (申双和), Sheng Q (盛 琼). Changes in pan evaporation and its cause in China in the last 45 years. *Acta Meteorologica Sinica* (气象学报), 2008, **66**(3): 452–460 (in Chinese)
- [23] Li G-L (李国良), Fu Q (付 强), Sun Y (孙 勇), *et al.* Grey relational analysis model based on weighted entropy and its application. *Journal of Water Resources & Water Engineering* (水资源与水工程学报), 2006, **17**(6): 15–18 (in Chinese)
- [24] Zhao S (赵 森), Yu J-H (于江辉), Zhou H (周 浩), *et al.* Evaluation of agronomic traits in Javanica rice based on grey correlation degree analysis. *Research of Agricultural Modernization* (农业现代化研究), 2013, **34**(3): 358–361 (in Chinese)
- [25] Yang Z-Y (杨重玉). Gray correlation of natural disasters and the grain output in Hunan. *Journal of Hunan Agricultural University (Social Sciences)* (湖南农业大学学报·社会科学版), 2013, **14**(2): 6–9 (in Chinese)
- [26] Ren Y-Z (任玉忠), Dong X-G (董新光), Wang Z-G (王志国). Influential factors of evapotranspiration based on grey relational analysis. *Chinese Agricultural Science Bulletin* (中国农学通报), 2010, **26**(12): 376–379 (in Chinese)
- [27] Luo Y-F (罗玉峰), Jiao X-Y (缴锡云), Peng S-Z (彭世彰), *et al.* Analysis of long-term trends in reference crop evapotranspiration in Haihe Basin. *Journal of Irrigation and Drainage* (灌溉排水学报), 2009, **28**(1): 10–13 (in Chinese)
- [28] Jiao J-L (焦建丽), Kang W-Y (康雯瑛), Wang J (王 军), *et al.* Temporal and spatial change analysis of sunshine hour in Henan. *Meteorological and Environmental Sciences* (气象与环境科学), 2008, **31**(suppl.): 4–6 (in Chinese)
- [29] Stanhill G, Cohen S. Global dimming: A review of the evidence for a widespread and significant reduction in global radiation with discussion of its probable causes and possible agricultural consequences. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2001, **107**: 255–278
- [30] Ren G-Y (任国玉), Guo J (郭 军), Xu M-Z (徐铭志), *et al.* Climate changes of China's mainland over the past half century. *Acta Meteorologica Sinica* (气象学报), 2005, **63**(6): 942–956 (in Chinese)
- [31] Ji X-J (姬兴杰), Zhu Y-Y (朱业玉), Gu W-L (顾万龙). Analysis on trends in annual reference crop evapotranspiration and its impact climatic factors in Henan Province during 1971 to 2010. *Chinese Journal of Agrometeorology* (中国农业气象), 2013, **4**(1): 14–22 (in Chinese)
- [32] Ni G-H (倪广恒), Li X-H (李新红), Cong Z-T (丛振涛), *et al.* Temporal and spatial characteristics of reference evapotranspiration in China. *Transactions of the Chinese Society Agricultural Engineering* (农业工程学报), 2006, **22**(5): 1–4 (in Chinese)

作者简介 宋 妮,女,1979 年生,硕士,助理研究员.主要从事作物需水监测与估算研究. E-mail: ngssongni@163.com

责任编辑 杨 弘