

张浩, 马晓群, 王晓东. 2015. 安徽省冬小麦水分盈亏特征及其对产量的影响. 气象, 41(7): 899-906.

安徽省冬小麦水分盈亏特征及其对产量的影响^{* 1}

张 浩 马晓群 王晓东

安徽省气象科学研究所, 安徽省大气科学与卫星遥感重点实验室, 合肥 230031

提 要: 利用安徽省 1971—2010 年的气象资料和冬小麦产量资料, 采用水分盈亏指数分析了安徽省冬小麦全生育期和关键期(孕穗至乳熟期)水分盈亏的时空变化特征, 以及旱涝对产量的影响。结果表明: 冬小麦全生育期和关键期水分盈亏指数基本呈纬向分布, 合肥以北水分亏缺明显, 江淮南部及其以南地区水分供应基本充足, 越往南水分盈余程度越大, 总体来看缺水程度关键期大于全生育期; 近 40 年冬小麦水分盈亏指数的时间变化趋势不明显, 但年际波动大, 旱涝灾害风险增加。干旱主要发生在沿淮淮北地区, 涝渍在江淮及其以南地区发生频率较高, 典型旱涝年平均减产率分别为 4.2% 和 12.4%; 造成冬小麦减产 10% 的中度旱灾风险北部大于南部, 中度涝灾风险南部大于北部。南部涝渍风险和造成的产量损失明显大于北部的干旱, 水分偏多的南部地区要尽量减少冬小麦的种植。

关键词: 冬小麦, 水分盈亏, 时空变化, 减产

中图分类号: P49, S166

文献标志码: A

doi: 10.7519/j.issn.1000-0526.2015.07.012

Water Budget Characteristics of Winter Wheat and Its Impact on the Yield in Anhui Province

ZHANG Hao MA Xiaoqun WANG Xiaodong

Anhui Institute of Meteorological Sciences, Key Laboratory of Atmospheric Science and Satellite Remote Sensing, Hefei 230031

Abstract: Based on the meteorological data and the winter wheat yield data of 78 weather stations in Anhui Province from 1971 to 2010, the spatiotemporal variation of the water budget during the whole growth period and critical period of winter wheat (from booting to milk ripening stages) in Anhui Province was analyzed using the water budget index. The occurrence of droughts and floods and its impact on the winter wheat yield was also analyzed using the water budget index as the drought-flood indicator. The results showed that the water budget index during the whole growth period and critical period of the winter wheat presents zonal distribution and decreases from south to north. The water deficit occurs significantly in the area north to Hefei and the water supply is adequate in the southern part of the Yangtze-Huaihe Area and the region south to this area, with large water surplus in south and small in north. On the whole, the water shortage degree is greater in the critical period than in the whole growth period. The change trend of the water budget index is not significant during the past 40 years. However, the interannual variation of the water budget index is obvious due to the large variation coefficient of the precipitation, increasing the risk of droughts and floods. The drought occurs mainly in the area along Huaihe River and the part north to the river. The frequency of waterlogging is higher in the Yangtze-Huaihe Area and the region south. The average yield reduction rates of the winter wheat due to the drought and the flood are 4.2% and 12.4%, respectively. There is a significantly positive (negative) correlation between water budget index and relative meteorological yield in typical drought (flood) year of winter wheat. The medium drought risk of

* 公益性行业(气象)科研专项(GYHY201006027)和国家科技支撑计划(2012BAD04B09)共同资助

2014 年 10 月 29 日收稿; 2014 年 12 月 11 日收修定稿

第一作者: 张浩, 主要从事农业气候资源影响评价和农业气象灾害评估工作. Email: hero-1225@163.com

winter wheat is greater in north area than in south area, and the medium waterlogging risk is greater in south area. It is necessary to minimize the planting of the winter wheat in the south area where water is more because the yield loss caused by the waterlogging is greater than the drought.

Key words: winter wheat, water budget, spatiotemporal variation, yield reduction

引 言

旱涝灾害主要由降水异常引起,其对农业的影响程度不仅需要考虑到降水、灌溉等影响水分供给的因子,还要考虑不同作物的水分需求(高晓容等,2012;王晓东等,2013)。目前用于农业旱涝的评价指标主要有两类,一是反映水分供给的降水量指标,如标准化降水指数、降水距平百分率、Z 指数等,另一类是反映水分供给和需求比例的复合指标,如相对湿润度指数、Palmer 指标、作物水分亏缺指数等(Guttman,1998;唐伍斌,2009;Hayes, et al,1999;姚晓军等,2013;王景红等,2013;谢五三等,2014;宋迎波等,2013;李昊宇等,2012;李德等,2012)。与前者相比,后者更能反映农作物水分盈亏和旱涝状况,国内学者采用该类指标分析了不同区域、不同作物的水分供需状况和旱涝变化特征(杨勤业等,1990;杨兴国等,2004;李春梅等,2004;黄晚华等,2009;王鹏云等,2010;蔡菁菁等,2013),吴荣军等(2013)通过构建干旱综合风险指数,开展河北省干旱风险区划研究,而将该指标分析得出的区域水分盈亏状况与作物减产程度相联系的研究尚未见相关报道。

安徽地处中国东部,跨长江、淮河中下游,自然条件优越,是我国冬小麦主产区之一,2006—2010 年平均小麦播种面积 2341 千公顷,年产量占全国小麦总产的比例超过 10%。但由于该区处于南北气候过渡带,冷暖气团交汇频繁,且降水年际变化大,旱涝灾害频发(马晓群等,2003;2009;张爱民等,2007;许莹等,2014),北部水分供应不足,南部水分过多,是限制冬小麦稳产、高产的主要因子。因此,研究冬小麦生育期水分供需状况及其对产量的影响,对安徽省冬小麦种植规划和合理灌溉有重要的指导意义。本文采用水分盈亏指数分析安徽省 1971—2010 年冬小麦全生育期和关键期(孕穗至乳熟期)水分盈亏的时空变化特征,进一步分析旱涝对冬小麦产量的影响,为安徽省冬小麦生产合理用水和防灾减灾提供科学依据。

1 资料和方法

1.1 数据来源

本文所用安徽省 1971—2010 年 78 个市、县气象观测站的逐日气象资料(包括平均气温、最高气温、最低气温、气压、水汽压、相对湿度、降水量、风速和日照时数)来源于安徽省气象信息中心,62 个市、县的冬小麦产量资料来自安徽省统计年鉴,与冬小麦主产区台站气象观测资料相对应。

1.2 研究方法

1.2.1 冬小麦种植分区

综合考虑地理气候条件、作物品种、发育期和产量等因素,并结合行政区域,把安徽省冬小麦种植区分为两个区:沿淮淮北冬麦区和淮河以南冬麦区,气象台站分布和冬小麦分区情况见图 1。安徽省冬小麦 10 月中、下旬自北向南陆续播种,次年 5 月下旬至 6 月上旬自南向北先后收获。由于冬小麦不同生育阶段对水分胁迫的敏感性不同,尤其是孕穗至乳熟期对水分最敏感(许莹等,2011),也是对产量形成

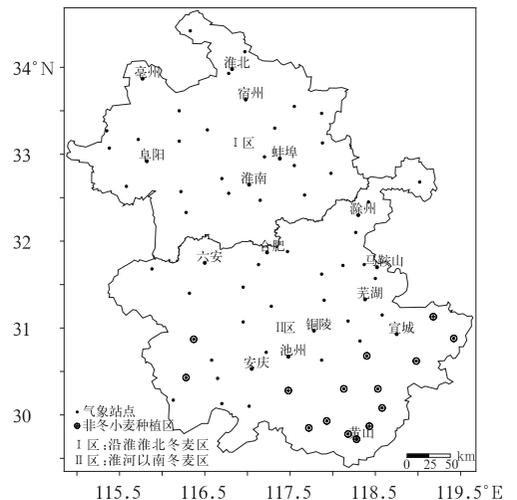


图 1 安徽省冬小麦种植分区和站点分布

Fig. 1 Division of winter wheat and distribution of meteorological stations in Anhui

最关键的时期,因此本文主要对冬小麦全生育期和水分关键期(简称关键期)的水分盈亏特征进行分析。

1.2.2 水分盈亏指数

根据农田水分平衡原理,冬小麦某一生育阶段的水分盈亏指数(I)由该生育阶段的自然供水量和需水量两部分组成(高晓容等,2012;张玉芳等,2011),其表达式为:

$$I = \frac{W - ET_m}{ET_m} \quad (1)$$

式中, W 为某时段的自然供水量,在不考虑灌溉的情况下即为降水量(单位:mm); ET_m 为同一时段的需水量(单位:mm); I 为水分盈亏指数,正值表示水分有盈余,负值表示水分亏缺。冬小麦某一生育阶

段的降水量和需水量以日为时间步长进行累加得到。其中作物需水量又称潜在蒸散量(ET_m),定义为一种作物生长在开阔的田地中,土壤条件(水、肥)不受限制,在给定的生长环境中充分发挥生产潜力的状况下,满足作物蒸散耗水所需的水分(Allen et al,1998):

$$ET_m = K_c \cdot ET_0 \quad (2)$$

式中, K_c 为相应时段的作物系数,与作物本身的生物学特征、产量水平和土壤条件等因素有关,本文引用文献(陈玉民等,1995;丁德峻等,1994;彭世彰等,2004)的研究成果,根据代表站数值确定安徽省冬小麦逐月作物系数(表1)。 ET_0 为相应时段的参考作物蒸散量。

表1 安徽省冬小麦逐月作物系数

Table 1 Monthly crop coefficient of winter wheat in Anhui

月份	10	11	12	1	2	3	4	5	6
K_c	0.71	0.94	0.89	0.80	0.92	1.06	1.41	1.30	0.63

采用联合国粮食及农业组织(Food and Agriculture Organization of the United Nations, FAO)1998年推荐并修订的Penman-Monteith公式计算参考作物蒸散量(Allen et al,1998):

$$ET_0 = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} U_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34U_2)} \quad (3)$$

式中, R_n 为到达作物表面的净辐射(单位: $\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$); G 为土壤热通量(单位: $\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$),以日为步长计算 ET_0 时, G 取0; γ 为干湿常数(单位: $\text{kPa} \cdot \text{C}^{-1}$); T 为2 m高度气温(单位: C); U_2 为2 m高度风速(单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$); e_s 为饱和水汽压(单位:kPa); e_a 为实际水汽压(单位:kPa); Δ 为饱和水汽压曲线斜率(单位: $\text{kPa} \cdot \text{C}^{-1}$)。以上各项参数的计算均采用FAO推荐的方法,以日为时间步长计算 ET_0 ,然后再累计得到各发育期的参考作物蒸散量。

1.2.3 冬小麦相对气象产量

农作物的实际产量取决于当时的社会生产水平和气象条件的影响,并受一些诸如病虫害等随机因素的影响。由于随机因素具有其偶然性和局地性,一般忽略不计,因此气象产量可表示为趋势产量和实际产量的差值。由于气象产量是一个非平稳序列,随着生产力的发展而变幅增大,因此引入相对气

象产量:

$$Y_w = \frac{Y_s - Y_t}{Y_t} \times 100\% \quad (4)$$

式中, Y_w 为相对气象产量, Y_s 为实际产量, Y_t 为趋势产量。其中,趋势产量是反映农业生产水平发展的长周期产量分量,本文采用线性、曲线、滑动平均等多种模拟方法对各市、县的冬小麦趋势产量进行分段模拟,并对分解的合理性进行检验。在相对气象产量序列中, Y_w 为正表示增产, Y_w 为负表示减产,其数值定义为减产率。

1.2.4 冬小麦典型旱涝年确定

基于水分盈亏指数的安徽省冬小麦旱涝阈值主要参照气象行业标准“小麦干旱灾害等级”(中国气象科学研究院,2007)和相关文献结果(陈玉民等,1995;肖晶晶等,2012)(表2)。其中水分盈亏指数综合考虑全生育期和关键期的水分盈亏状况,并以全生育期的水分盈亏指数为主,关键期作为辅助。权重的确定:首先在I区和II区分别选择两个站点,将冬小麦全生育期和关键期的水分盈亏指数赋予不同的权重,通过加权平均得到综合水分盈亏指数,并与相对气象产量做相关分析,然后以相关性最好的权重组合计算综合水分盈亏指数(最后确定全生育期和关键期的权重为:8:2)。依据表2的旱涝阈值,并结合《中国气象灾害大典》(安徽卷)(翟武全,

2007)和《安徽气象志》等记录的旱涝实况综合确定各市、县冬小麦典型旱涝年份。

表 2 基于水分盈亏指数的冬小麦旱涝阈值

Table 2 Drought and flood threshold of winter wheat based on water budget index

	干旱	涝渍
沿淮淮北冬麦区	$G \leq -0.3$	$G \geq 0.2$
淮河以南冬麦区	$G \leq -0.2$	$G \geq 0.3$

注:G为综合水分盈亏指数。

Note: G expresses comprehensive water budget index.

2 结果与分析

2.1 冬小麦生育期水分盈亏时空变化特征

2.1.1 水分盈亏指数空间分布

安徽省冬小麦全生育期平均水分盈亏指数大体呈纬向分布特征,合肥以北水分盈亏指数普遍在 -0.2 以下,淮北北部在 $-0.6 \sim -0.4$,水分亏缺更加明显;合肥以南水分盈亏指数在 0 以上,其中长江以南和大别山区南部 >0.4 ,皖南山区甚至超过 1.0 (图 2a)。冬小麦关键期水分盈亏指数的空间分布趋势与全生育期基本一致,但水分亏缺的强度总体上要大于全生育期,范围也向南扩展,水分盈亏指数 <-0.4 的区域基本覆盖整个沿淮淮北麦区;江淮之间南部及以南地区水分盈余(图 2b)。可见,沿淮淮北地区在冬小麦生长期缺水比较严重,特别是

中后期水分严重不足,而合肥以南地区则是水分过多导致涝渍灾害频繁。根据冬小麦种植适宜性区划,江南中部以南水分盈亏指数 >0.6 的地区由于降水过多,基本不适宜冬小麦种植,其中皖南高海拔地区更加不适宜(马晓群等,2012)。

2.1.2 水分盈亏指数时间变化

图 3 为安徽省近 40 年冬小麦全生育期和关键期水分盈亏指数的年际变化。可以看出,Ⅰ区冬小麦水分盈亏指数呈较平稳的年际波动(图 3a),全生育期和关键期水分盈亏指数分别在 $-0.65 \sim 0.36$ 、 $-0.9 \sim 0$;全生育期除个别年份外水分盈亏指数均为负值,关键期所有年份均为负值,80%的年份 <-0.3 ,水分亏缺更加突出,其中 1978—1984、1992—1997 和 2003—2007 年水分盈亏指数 <-0.4 ,部分年份 <-0.6 。Ⅱ区水分盈亏指数的变化特征(图 3b)与Ⅰ区有所不同,年际波动较大,数值明显高于Ⅰ区,全生育期和关键期水分盈亏指数分别在 $-0.05 \sim 1.31$ 、 $-0.58 \sim 1.77$ (图 3b)。全生育期除 1996 和 1997 年外水分盈亏指数均为正值,其中 49%的年份 >0.3 ;关键期有 62%的年份水分有盈余,其中 38%的年份水分盈亏指数 >0.3 。北干南湿的气候特征非常明显。

进一步分析水分盈亏指数的构成因素——降水量和需水量的变化情况(表 3)。从时间变化趋势看,全生育期,Ⅰ区需水量和降水量均呈增加趋势,虽未通过显著性水平检验,但由于降水量增加程度大于需水量,因而水分盈亏指数呈增加趋势;Ⅱ区

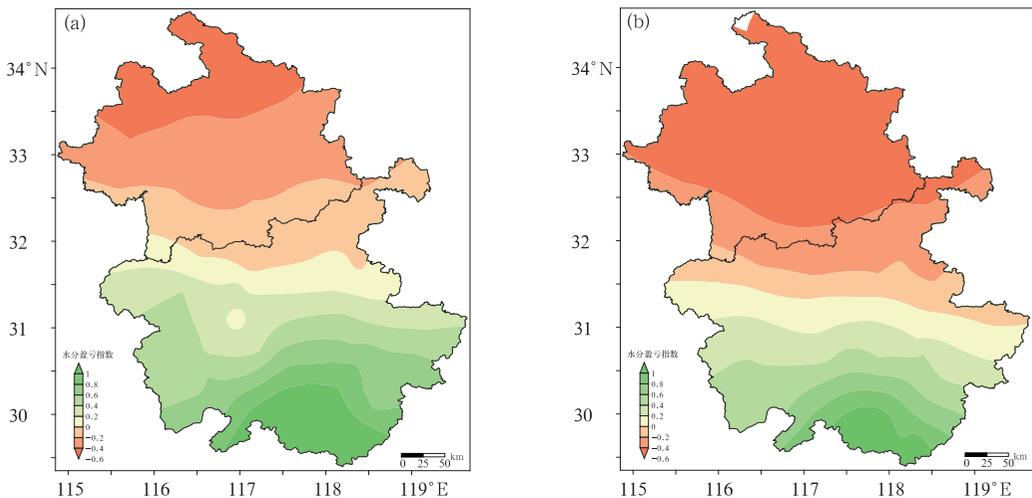


图 2 冬小麦全生育期(a)和关键期(b)水分盈亏指数空间分布

Fig. 2 Spatial distribution of water budget index during whole growth period (a), and critical water period (b) of winter wheat

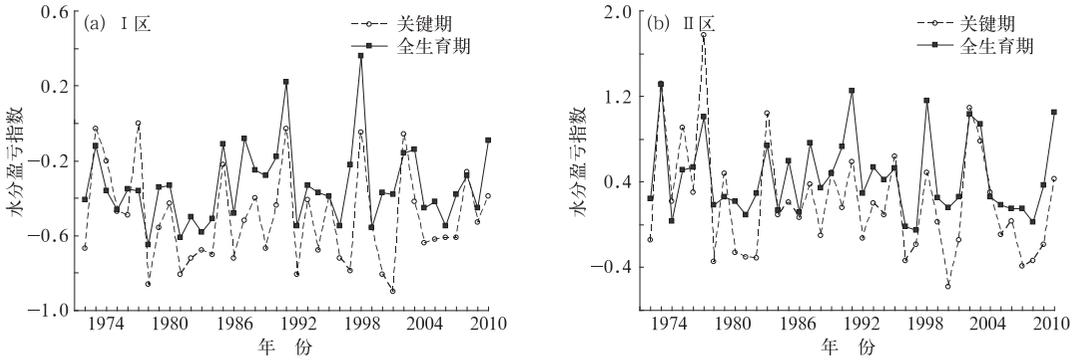


图 3 冬小麦全生育期和关键期水分盈亏指数年际变化

Fig. 3 Interannual variation of water budget index during whole growth period and critical water period of winter wheat

表 3 冬小麦全生育期和关键期需水量、降水量及水分盈亏指数变化趋势

Table 3 Change trends of water demand, precipitation, water budget index during whole growth period and critical water period of winter wheat

	全生育期			关键期		
	需水量 /mm · (10 a) ⁻¹	降水量 /mm · (10 a) ⁻¹	水分盈亏指数 /(10 a) ⁻¹	需水量 /mm · (10 a) ⁻¹	降水量 /mm · (10 a) ⁻¹	水分盈亏指数 /(10 a) ⁻¹
沿淮淮北冬麦区	1.70	14.20	0.025	0.86	-3.57	-0.017
淮河以南冬麦区	8.36 *	1.82	-0.017	5.03	-17.19	-0.121

注: * 表示通过 $\alpha=0.05$ 显著性水平检验。

Note: * indicates passing through $\alpha=0.05$ significance level of test.

需水量和降水量也呈增加趋势,其中需水量的变化趋势通过 $\alpha=0.05$ 的显著性水平检验,由于需水量的增加程度大于降水量,因此水分盈亏指数呈减少趋势,但未通过显著性水平检验。关键期两个冬麦区水分供需的变化趋势一致,需水量呈增加趋势,降水量呈减少趋势,因此水分盈亏指数呈减少趋势,但均未通过显著性水平检验。

从变异系数看,水分盈亏指数的变异系数较大,全生育期和关键期均超过 0.6(表 4)。水分盈亏指数的变异系数受需水量和降水量的共同影响,而降水量的变异系数远大于需水量变异系数,因此水分盈亏指数的年际变化主要由降水量的年际变化引起。由于水分盈亏指数的年际变化大,导致发生旱

涝灾害的风险加大。

2.2 基于水分盈亏指数的旱涝频率及其对产量的影响

在冬小麦典型旱涝年基础上统计分析旱、涝年份分别超过 5 年的各站点冬小麦平均减产率(典型旱涝年少于 5 年的站点不统计)。

2.2.1 干旱发生频率及其影响

统计结果表明,安徽省冬小麦干旱主要发生在沿淮淮北和江淮东部,干旱频率超过 20%,其中淮北大部分地区超过 30%,砀山、萧县最大为 43.6%;而江淮之间南部及以南地区冬小麦生育期间干旱很少发生(图 4a)。干旱导致淮北大部、沿淮中东部,以及江淮部分地区冬小麦有不同程度减产,平均减产率为 4.2%(图 4b),其中减产率超过 5%的沿淮淮北大部有 6 个站,江淮之间有 1 站,固镇减产率最大为 9.2%;沿淮淮北中西部、江淮之间东南部相对气象产量在 0~5%,产量略有增加,这可能与该地区旱情轻于北部,且水利基础设施完善、抗灾能力较强有关。

2.2.2 涝渍发生频率及其影响

与干旱发生分布情况相反,冬小麦涝渍主要发

表 4 冬小麦全生育期和关键期需水量、降水量和水分盈亏指数变异系数

Table 4 Variation coefficients of precipitation, water demand, water budget index at whole growth period and critical water period of winter wheat

	需水量	降水量	水分盈亏指数
全生育期	0.063	0.203	0.783
关键期	0.099	0.325	0.650

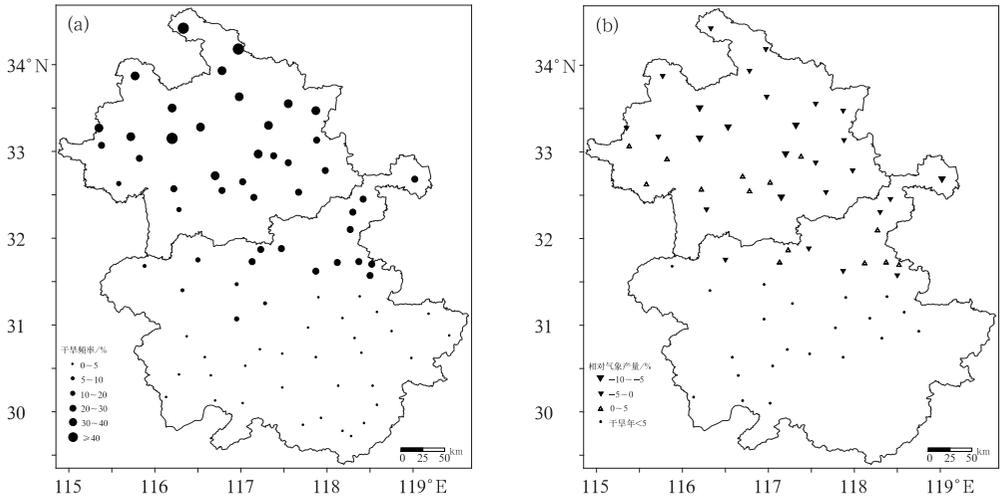


图 4 冬小麦干旱频率(a)和典型干旱年相对气象产量(b)

Fig. 4 Drought frequency (a) and relative meteorological yield in typical drought year (b) of winter wheat

生在江淮及以南地区,涝渍频率由北向南逐渐增加,其中江淮之间涝渍频率<30%,沿江江南大部分地区涝渍频率>30%(图 5a),涝渍频率最大的沿江江南南部地区不适宜种植冬小麦。涝渍导致江淮及沿江江南地区冬小麦均有不同程度减产(图 5b),平均减产率为 12.4%,减产率较高的区域为江淮之间,

大部分县、区大于 10%,全椒、滁州、肥东和六安冬小麦种植面积较大、产量水平相对较高的地区减产率甚至大于 20%;而涝渍频率较高的沿江江南西部等地,由于冬小麦种植面积小、产量水平相对较低,减产率<10%。总体来看,涝渍对冬小麦的产量损失大于干旱。

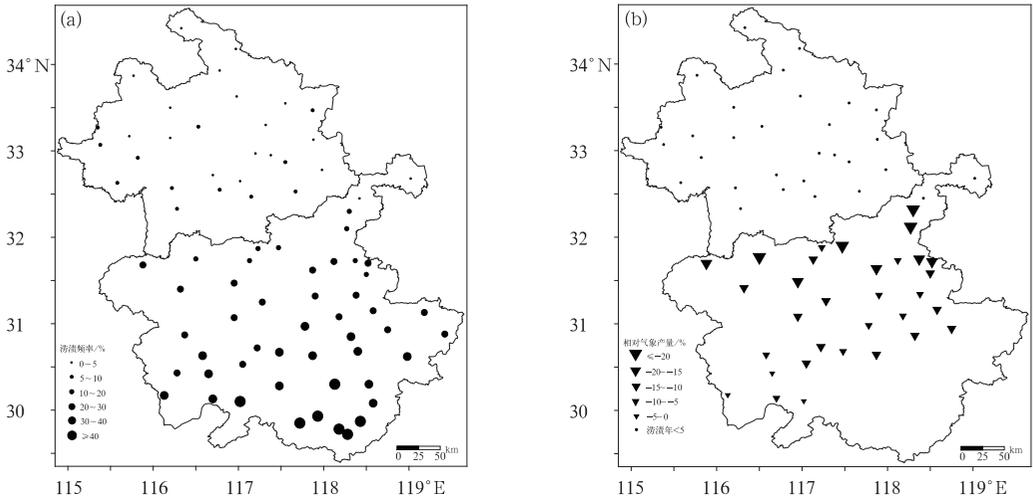


图 5 冬小麦涝渍频率(a)和典型涝渍年相对气象产量(b)

Fig. 5 Waterlogging frequency (a) and relative meteorological yield in typical waterlogging year (b) of winter wheat

2.3 水分盈亏指数与冬小麦产量的定量关系

进一步分析冬小麦典型旱涝年的水分盈亏指数与相对气象产量的定量关系。结果表明,干旱年的水分盈亏指数与冬小麦相对气象产量呈显著正相

关,即水分盈亏指数越小(干旱越重),相对气象产量越小(减产率越高),相关系数为 0.498($P>0.001$),根据拟合方程,当水分盈亏指数<-0.584,减产率超过 10%(图 6a)。而涝渍年的水分盈亏指数与冬小麦相对气象产量呈显著负相关(图 6b),即水分盈

亏指数越大(涝渍越重),相对气象产量越小(减产率越高),相关系数为 $-0.451(P>0.001)$,当水分盈亏指数 >0.61 时,减产率超过 10% ,水分盈亏指数 >1.34 ,减产率超过 20% 。说明当水分盈亏指数 <-0.6 或 >0.6 时可能造成冬小麦显著减产,其可作

为水分盈亏指数中度旱涝指标。统计表明,中度旱灾风险淮北平均为 10% ,沿淮平均为 5% ,淮河以南地区无中度旱灾风险;中度涝灾风险沿江江南平均为 20% ,江淮地区平均为 7% ,沿淮淮北无风险(图略)。

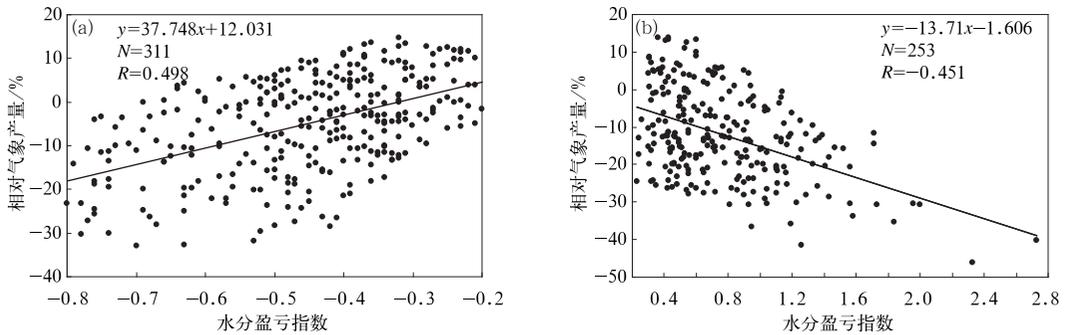


图6 冬小麦典型旱年(a)和涝年(b)水分盈亏指数与相对气象产量相关性分析

Fig. 6 Correlation analyses between water budget index and relative meteorological yield in typical drought (a) and flood (b) year of winter wheat

3 结论与讨论

本文采用水分盈亏指数分析了安徽省冬小麦全生育期和关键期水分盈亏的时空变化特征,在此基础上统计分析了冬小麦旱涝发生情况及其对产量的影响。研究结果可为安徽省冬小麦种植规划和合理用水提高依据。

(1) 冬小麦全生育期和关键期水分盈亏指数基本呈纬向分布特征,合肥以北水分亏缺明显,淮北北部更为严重,江淮之间南部及以南地区水分供应充足,越往南水分盈余程度越大,总体来看缺水程度关键期大于全生育期。冬小麦水分盈亏指数的时间变化趋势不明显,但由降水变化引起的年际波动较大。

(2) 冬小麦干旱主要发生在沿淮淮北地区,涝渍主要发生在江淮及以南地区。旱涝导致冬小麦不同程度减产,典型旱、涝年平均减产率分别为 4.2% 和 12.4% ,涝渍造成的产量损失明显大于干旱,因此水分偏多的南部地区要尽量减少冬小麦的种植。

(3) 冬小麦典型旱(涝)年水分盈亏指数与相对气象产量呈显著正(负)相关,当水分盈亏指数 <-0.6 或 >0.6 时可能造成冬小麦显著减产,其可作为水分盈亏指数中度旱涝指标。中度旱灾风险淮北平均为 10% ,沿淮平均为 5% ;中度涝灾风险沿江江南平均为 20% ,江淮地区平均为 7% 。

(4) 水分盈亏指数计算中的供水量部分本文仅考虑了自然降水量,对土壤有效底墒和降水的有效性考虑不是很充分,可能导致计算结果存在一定误差,有待后续深入研究。

参考文献

- 蔡菁菁,王春乙,张继权. 2013. 东北地区玉米不同生产阶段干旱冷害危险性评价. 气象学报, 71(5): 976-986.
- 陈玉民,郭国双,王广兴,等. 1995. 中国主要作物需水量与灌溉. 北京: 水利电力出版社.
- 丁德峻,张旭辉. 1994. 江苏淮北地区主要作物需水量的初步研究. 资源科学, 16(3): 40-46.
- 高晓容,王春乙,张继权,等. 2012. 近50年东北玉米生育阶段需水量及早涝时空变化. 农业工程学报, 28(12): 101-109.
- 黄晚华,杨晓光,曲辉辉,等. 2009. 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. 农业工程学报, 25(8): 28-34.
- 李春梅,高素华. 2004. 我国北方半干旱区草地水分供需状况研究. 干旱区研究, 21(4): 338-342.
- 李德,张学贤,刘瑞娜. 2012. 冬小麦冬季干旱时段灌溉气象适宜指数研究. 气象, 38(12): 1565-1571.
- 李昊宇,王建林,郑昌玲,等. 2012. 气候适宜度在华北冬小麦发育期预报中的应用. 气象, 38(12): 1554-1559.
- 马晓群,陈晓艺,盛绍学. 2003. 安徽省冬小麦渍涝灾害损失评估模型研究. 自然灾害学报, 12(1): 158-162.
- 马晓群,陈晓艺,姚筠. 2009. 安徽淮河流域各级降水时空变化及其对农业的影响. 中国农业气象, 30(1): 25-30.
- 马晓群,张宏群,吴文玉,等. 2012. 安徽省冬小麦品种生态气候适宜性分析和精细化区划. 中国农业气象, 33(1): 86-92.
- 彭世彰,索丽生. 2004. 节水灌溉条件下作物系数和土壤水分修正系

- 数试验研究. 水利学报, 35(1):17-22.
- 宋迎波, 王建林, 郑昌玲, 等. 2013. 冬小麦气候适宜诊断指标确定方法探讨. 气象, 39(6):768-773.
- 唐伍斌. 2009. 广西秋冬季旱涝的时空分布特征及同期环流分析. 气象, 35(1):108-113.
- 王景红, 张勇, 刘璐. 2013. 基于多尺度标准化降水指数的陕西苹果主产区气象干旱分析. 气象, 39(12):1656-1662.
- 王鹏云, 王辉, 李万春, 等. 2010. 昆明小麦生长期需水量和缺水状况研究. 麦类作物学报, 30(1):111-115.
- 王晓东, 马晓群, 许莹, 等. 2013. 淮河流域主要农作物全生育期水分盈亏时空变化分析. 资源科学, 35(3):665-672.
- 吴荣军, 史继清, 关福来, 等. 2013. 基于风险区划的农业干旱保险费率厘定——以河北省冬麦区为例. 气象, 39(12):1649-1655.
- 肖晶晶, 霍治国, 金志凤, 等. 2012. 冬小麦节水灌溉气象等级指标. 生态学杂志, 31(10):2521-2528.
- 谢五三, 王胜, 唐为安, 等. 2014. 干旱指数在淮河流域的适用性对比. 应用气象学报, 25(2):176-184.
- 许莹, 马晓群, 田晓飞, 等. 2011. 安徽省冬小麦和一季稻分时段水分敏感性研究. 中国农学通报, 27(24):33-39.
- 许莹, 马晓群, 王晓东, 等. 2014. 安徽省冬小麦春霜冻害气象指标的研究. 气象, 40(7):852-859.
- 杨勤业, 李高社, 朱会义. 1990. 黄土高原主要农作物水分盈亏与雨养农业问题. 自然资源学报, 5(1):51-59.
- 杨兴国, 刘宏谊, 傅朝, 等. 2004. 甘肃省主要农作物水分供需特征研究. 高原气象, 23(6):821-827.
- 姚晓军, 张晓, 孙美平, 等. 2013. 1960—2010年中国西北地区水分盈亏量时空特征. 地理研究, 32(4):607-616.
- 翟武全. 2007. 中国气象灾害大典(安徽卷). 北京:气象出版社.
- 中国气象科学研究院. 2007. 小麦干旱灾害等级(GX/T81-2007). 北京:气象出版社.
- 张爱民, 马晓群, 杨太明, 等. 2007. 安徽省旱涝灾害及其对农作物产量影响. 应用气象学报, 18(5):619-626.
- 张玉芳, 王锐婷, 陈东东, 等. 2011. 利用水分盈亏指数评估四川盆地玉米生育期干旱状况. 中国农业气象, 32(4):615-620.
- Allen R G, Pereira L S, Raes D, et al. 1998. Crop Evapotranspiration—Guidelines for Computing Crop Water Requirements—FAO Irrigation and Drainage Paper 56. Rome: Food and Agriculture Organization of United Nations.
- Guttman N B. 1998. Comparing the palmer drought index and the standardized precipitation index. J Amer Water Res Ass, 34(1):113-121.
- Hayes M J, Svoboda M D, Willhite D A, et al. 1999. Monitoring the 1996 drought using the standardized precipitation index. Bull Amer Meteor Soc, 80(3):429-438.