中国生态农业学报 2018 年 4 月 第 26 卷 第 4 期
Chinese Journal of Eco-Agriculture, Apr. 2018, 26(4): 547−558

DOI: 10.13930/j.cnki.cjea.170843

王连喜, 卢媛媛, 李琪, 胡正华, 吴东丽, 张阳, 王田. 基于 AEZ 模型的河南省冬小麦产量差时空特征分析[J]. 中国生态农业学报, 2018, 26(4): 547−558

WANG L X, LU Y Y, LI Q, HU Z H, WU D L, ZHANG Y, WANG T. Spatio-temporal analysis of winter wheat yield gaps in Henan Province using AEZ model[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2018, 26(4): 547−558

基于 AEZ 模型的河南省冬小麦产量差时空特征分析*

王连喜[1,2], 卢媛媛[1], 李 琪[1,2], 胡正华[1], 吴东丽[3], 张 阳[1], 王 田[1]

(1. 江苏省农业气象重点实验室 南京 210044; 2. 江苏省大气环境与装备技术协同创新中心 南京 210044; 3. 中国气象局气象探测中心 北京 100081)

摘 要: 各种产量差的分析可以揭示产量的提升空间及研究区域内各种限制因子对产量提高的限制作用。为研究气候变化背景下, 各气候要素对冬小麦产量差的影响, 本文以河南省为研究区域并划分为 5 个类型区(Ⅰ, 豫北种植区; Ⅱ, 豫东种植区; Ⅲ, 浅山丘陵盆地种植区; Ⅳ, 淮北平原、南阳盆地种植区; Ⅴ, 豫南稻茬麦区)利用 14 个气象站点的资料, 运用 AEZ 模型计算得到 1961—2013 年该省的冬小麦生产潜力, 再根据产量差法计算得到 YG_{1-2}(光合生产潜力与光温生产潜力的差距)、YG_{2-3}(光温生产潜力与气候生产潜力的差距)以及 YG_{2-a}(光温生产潜力与大田平均产量的差距)3 个水平的产量差。研究结果表明, 1961—2013 年河南省冬小麦光合生产潜力下降, 光温生产潜力提高, 气候生产潜力基本不变。对大田平均产量的分析表明, 14 个站点平均产量存在较大差异, 冬小麦产量总体逐渐增长。从时间变化上看, 河南省冬小麦 YG_{1-2} 总体呈现出递减趋势; YG_{2-3} 差距呈现出“V 型”, 谷值在 1981—1990 年; Ⅰ、Ⅱ、Ⅴ区 YG_{2-a} 呈现递减趋势, 而Ⅲ和Ⅳ区则呈现先增加再减少的趋势。从空间变化上看, 河南省冬小麦 YG_{1-2} 和 YG_{2-3} 自北向南递减, 而 YG_{2-a} 自东向西递增。各区域冬小麦增产潜力的排序为: Ⅲ区>Ⅴ区>Ⅳ区>Ⅱ区>Ⅰ区。农学因素是限制当地冬小麦产量差缩小的主要因素, 通过改善农学因素, 如: 改良更新冬小麦品种、提升现代农业生产技术、合理使用农药化肥、合理布局优质小麦区域等, 可缩小该区域冬小麦产量差距。

关键词: 冬小麦; AEZ 模型; 光合生产潜力; 光温生产潜力; 气候生产潜力; 产量差; 增产潜力; 农学因素

中图分类号: S512.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1671-3990(2018)04-0547-12

Spatio-temporal analysis of winter wheat yield gaps in Henan Province using AEZ model*

WANG Lianxi[1,2], LU Yuanyuan[1], LI Qi[1,2], HU Zhenghua[1], WU Dongli[3], ZHANG Yang[1], WANG Tian[1]

(1. Jiangsu Key Laboratory of Agricultural Meteorology, Nanjing 210044, China; 2. Jiangsu Collaborative Innovation Center of Atmospheric Environment and Equipment Technology, Nanjing 210044, China; 3. Meteorological Observation Center of China Meteorological Administration, Beijing 100081, China)

Abstract: Global climate change has become one of the most severe environmental problems facing human society. Agriculture is among the sectors with the most sensitive response to climate change. The analysis of yield gaps could reveal the factors limiting the growth and production of crops in various regions. Henan Province is the most important commodity grain

* 公益性行业(气象)科研专项(GYHY201506001)、中国气象局气象探测中心农业气象观测技术创新团队项目资助
王连喜, 主要从事农业气象与生态气象研究。E-mail: wlx4533@sina.com
收稿日期: 2017-09-15 接受日期: 2017-11-16

* This study was supported by the China Special Fund for Meteorological Research in the Public Interest (Major Projects) (GYHY201506001) and the Agricultural Meteorological Observation Technology Innovation Team of Meteorological Observation Centre of China Meteorological Administration.
Corresponding author, WANG Lianxi, E-mail: wlx4533@sina.com
Received Sep. 15, 2017; accepted Nov. 16, 2017

base in China, with rich climatic resources and remarkable climate change. Analysis of yield gaps and change trend of winter wheat yield in Henan Province are critical for understanding the impact of climate change on the potential productivity of winter wheat in the province. It also can be used to draw on advantages and avoid disadvantages of climatic change, making full and rational use of climatic resources of winter wheat. Current researches on the impact of climate change on crop yield gaps have often focused on large-scale analysis, few people divided the study area into small pieces. To improve the accuracy of simulated effects of climate change, Henan was divided into five planting areas, which were northern Henan planting area (Ⅰ), eastern Henan planting area (Ⅱ), shallow mountain hilly basin planting area (Ⅲ), Huaibei Plain and Nanyang Basin planting area (Ⅳ) and southern Henan planting area (Ⅴ). Data obtained from 14 meteorological stations were used in AEZ model to simulate potential productivities of winter wheat for 1961–2013 in Henan Province. Then yield gaps were calculated, which were gap between photosynthetic potential productivity and light-temperature potential productivity (YG_{1-2}), gap between light-temperature potential productivity and climate potential productivity (YG_{2-3}) and gap between light-temperature potential productivity and average field yield (YG_{2-a}). The results showed that photosynthetic potential productivity of winter wheat in Henan Province decreased in 1961–2013. The light-temperature potential productivity increased and climate potential productivity remained basically unchanged. Analysis of average field yield showed significant differences in average outputs at 14 meteorological stations and the trend in winter wheat output gradually increased. YG_{1-2} of winter wheat decreased, while YG_{2-3} followed a Ⅴ-shaped trend with the valley occurring in 1981–1990. YG_{2-a} in Ⅰ, Ⅱ and Ⅴ areas had a decreasing trend, while that in Ⅲ and Ⅳ areas initially increased and then decreased. In terms of spatial change, YG_{1-2} and YG_{2-3} of winter wheat declined from north to south, while YG_{2-a} increased from east to west in Henan Province. The order of yield increase potential of winter wheat for each area was Ⅲ > Ⅴ > Ⅳ > Ⅱ > Ⅰ. Agronomic conditions were the main factors driving the dwindling gaps in winter wheat yield in Henan Province. By improving agronomic conditions (e.g., varieties, modern agricultural technology, reasonable pesticide and fertilizer use, and rational arrangement of high-quality regions), it was possible to reduce the gaps in winter wheat yield in the study area.

Keywords: Winter wheat; AEZ model; Photosynthetic potential productivity; Light-temperature potential productivity; Climate potential productivity; Yield gap; Production increasing potential; Agronomic factors

粮食安全是人类社会和国民经济可持续发展的根基，农业生产体系是粮食安全的重要保障。随着人均耕地面积日渐缩小，粮食安全问题日趋明显，因此，需要通过粮食产量的不断增长来满足日益增长的粮食需求，以达到保证粮食安全的目的[1]。粮食总产量增长的主要方法有两种，扩大粮食播种面积或者提高粮食单产水平。自 20 世纪 90 年代起，作物产量差研究一直是国际作物学研究方向的一个重要分支[2]。产量差的研究可以体现产量的增长空间以及研究区域内各限制因子对产量提升的制约作用，如自然(气候、土壤等)、技术、经济等因素。近百年来，全球气候发生了剧烈的改变，给人类社会、经济、生态系统的各个方面造成了影响或潜在威胁，进而出现了一系列不可小觑的问题。全球气候变化成为当今人类社会所面临的最严重的环境问题之一[3-5]。其中农业是对气候变化反应最为敏感的领域之一，研究气候变化背景下的产量差有助于我们理解气候因子对作物产量差的限制作用。刘保花等[6]通过总结近年发表的 64 篇经典文献，总结了世界三大粮食作物小麦(*Triticum aestivum*)、水稻(*Oryza sativa*)和玉米(*Zea mays*)的产量潜力和产量差的研究进展，并对生产潜力和产量差的 4 种常用方法进行了比较分析。研究表明：当前全世界小麦、水稻、玉米的农户产量分别实现了产量潜力的 60%、60%和 53%，这 3 大作物具有较大的增产潜力。刘志娟等[7]利用农业生产系统模拟模型(APSIM-Maize)和数理统计方法，分析了气候变化背景下 1961—2010 年东北三省春玉米种植区潜在产量与实际产量的差及各级产量差的时空分布特征，结果表明：东北三省春玉米潜在产量与农户实际产量之间的产量差呈明显的经向和纬向分布，即由南向北递减，由西向东递减。刘建刚等[8]通过农户调查的方法对吴桥县不同田块的产量差进行了研究，分析表明：中低产田块具有较大的产量提升空间。在冬小麦的生产投入构成中，肥料投入所占比例最大，并且不同收益的农户之间肥料投入呈现出明显的差异，而机械、农药、种子和灌溉等方面的投入差异不大。

目前已有的气候变化对作物产量差的影响研究主要集中在较大尺度，很少有人将研究区域划分成小块。河南省地处亚热带向暖温带过渡区，气候资源丰厚，气候变化特点也较为显著，全球气候变化背景下的气候变化趋势，既具有一致性，亦具有区域特殊性[9]。河南省又是全国最重要的商品粮基地，其产量状况对国家粮食安全具有重大影响[10-11]。本

研究将河南省分成 5 个种植区并按区域划分生育期，并按区域逐月修正光温生产潜力的作物生长量。分析了河南省冬小麦产量差的分布特征及其和气候变化的对应关系，了解其对作物发育的潜在影响，有助于当地冬小麦生产避害就利、充分合理利用气候资源、评估气候变化的潜在影响[12-14]。

1　研究区域概况及研究方法

1.1　研究区域概况

河南省地处北亚热带和暖温带气候交绥地区，气候具有明显的过渡性特征。每年 10 月到翌年 6 月上旬冬小麦生育期内，光能、热量以及水分资源比较充裕，农业资源潜力较大。但受地貌和季风的影响，气候资源地域差异性较明显，与此同时，由于处在温带向亚热带的过渡地带，挟制冬小麦生长的气象灾害也较为严峻且频繁[15-19]。

河南省冬小麦生育期内主要的气候特点：秋季温度适宜，中部和南部多数年份秋雨较多，西部和北部播种期间降水量年际间变幅较大；冬季少严寒，雨雪稀少；春季回温快，光照充足，常遇春旱；入夏气温偏高，易受干热风危害。因此河南省冬小麦具有分蘖期以及幼穗分化期长，籽粒灌浆期短的特征[15]。

为了体现河南省各区域的差异特征，本研究将河南省分为 5 个区：Ⅰ，豫北种植区，站点包括安阳、新乡、开封；Ⅱ，豫东种植区，站点包括商丘、西华、许昌、宝丰；Ⅲ，浅山丘陵盆地种植区，站点包括三门峡、卢氏、栾川；Ⅳ，淮北平原、南阳盆地种植区，站点包括南阳、驻马店、西峡；Ⅴ，豫南稻茬麦区，本文只选取了信阳 1 个站点(图 1)。

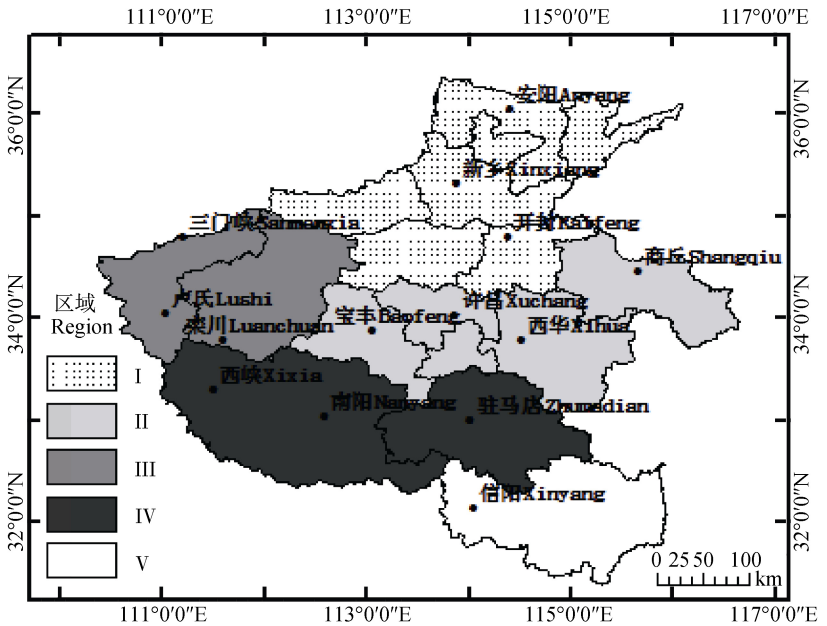

图 1　河南省冬小麦气候区划

Fig. 1　Climatic regionalization of winter wheat in Henan Province

Ⅰ：豫北种植区；Ⅱ：豫东种植区；Ⅲ：浅山丘陵盆地种植区；Ⅳ：淮北平原、南阳盆地种植区；Ⅴ：豫南稻茬麦区。Ⅰ: northern Henan planting area; Ⅱ: eastern Henan planting area; Ⅲ: shallow mountain hilly basin planting area; Ⅳ: Huaibei Plain and Nanyang Basin planting area; Ⅴ: southern Henan planting area.

1.2　研究方法

本研究采用 AEZ(Agro-ecological Zone)即农业生态地区法，计算冬小麦生产潜力，采用 C 语言编程实现生产潜力模型的计算；数据整理和图表绘制用 Microsoft Excel 完成；产量差距分布图以及区域分布图用 ArcGIS10.2 绘制；结果的差异显著性通过 SPSS 计算获得。

1.2.1　AEZ 模型介绍

AEZ 是卡萨姆(Kassam)为农业生态区项目拟定的计算作物光温水生产潜力的一种方法。具体方法是以标准作物的生物量、干物质总量为基础，然后依次进行温度订正、叶面积订正、净干物质订正和收获指数订正。这些订正过程都与具体的作物种类有关，并且分生育期进行。其中光合生产潜力的公式为：

$$Y_1 = f_0 y_0 + (1 - f_0) y_c \tag{1}$$

$$f_0 = (A_c - 0.5R_s)/0.8A_c \tag{2}$$

式中：Y_1 为光合生产潜力，即某种标准作物的干物质总产量(kg·hm^{-2})；y_0 是一定地区某种标准作物在一全阴天(理想情况下一整天都是阴天)里的干物

质生产率; y_c 是一定地区某种标准作物在一全晴天(理想情况下一整天都是无云晴天)里的干物质生产率; f_0 为一天中阴天所占部分又叫云层覆盖率; R_s 为太阳辐射或短波辐射通量; A_c 为晴天最大有效射入短波辐射[11]。

其中 R_s 的计算公式为:

$$R_s = (a + b \times n/N)R_a \tag{3}$$

光温生产潜力公式为:

$$Y_2 = C_L C_N C_H G[(0.8 + 0.011y_m)\, y_0 + (1 - f_0)(0.5 + 0.025y_m)y_c] \quad (y_m > 20\ \mathrm{kg \cdot hm^{-2} \cdot h^{-1}}) \tag{4}$$

$$Y_2 = C_L C_N C_H G[f_0(0.5 + 0.025y_m)\, y_0 + (1 - f_0)0.05y_m y_c] \quad (y_m < 20\ \mathrm{kg \cdot hm^{-2} \cdot h^{-1}}) \tag{5}$$

式中: Y_2 为作物的光温生产潜力($\mathrm{kg \cdot hm^{-2}}$); C_L 为作物在时间上和叶面积上的生长校正系数, 作物生长的总干物质生产是以假定有效叶面积为土地面积的 5 倍(LAI=5), 当叶面积低于这一值时, 必须进行校正(表 1)[15], 表 2(分区域逐月的具体较正值)是根据表 1 并结合冬小麦播后天数对应的叶面积指数计算所得; C_N 为净干物质生产量的校正系数, 凉气候条件下取 0.6, 暖气候条件下取 0.5; C_H 为作物收获指数; G 为作物全生育期天数; y_m 为作物的干物质生产率($\mathrm{kg \cdot hm^{-2} \cdot h^{-1}}$)。

表 1 不同叶面积指数下作物生长量校正值

Table 1 Correction values (C_L) of crop growth under different leaf area indexes

叶面积指数 Leaf area index	1	2	3	4	≥5
校正值 Correction value	0.32	0.58	0.78	0.91	1.00

气候生产潜力公式:

$$Y_3 = Y_2 \times f(p) \tag{6}$$

式中: Y_3 为冬小麦的气候生产潜力($\mathrm{kg \cdot hm^{-2}}$)。$f(p)$为水分订正函数, 主要从两个方面考虑: 一是降水量小于作物生育期内最大蒸腾蒸发量时, 生产潜力不能达到最大潜力值的情况; 二是降水量大于作物生育期内最大蒸腾蒸发量时, 能够满足作物生育期对水分的需求, 对生产潜力不构成限制的情况[16]。其计算公式为:

表 2 冬小麦生育期内河南省不同区域作物生长量校正值

Table 2 Correction values (C_L) of crop growth in different regions of Henan Province during growth period of winter wheat

区域 Region	月份 Month								
	10	11	11	1	2	3	4	6	6
Ⅰ	0.096	0.398	0.600	0.660	0.780	1.000	1.000	0.810	0.372
Ⅱ	0.096	0.398	0.590	0.640	0.760	1.000	1.000	0.850	0.372
Ⅲ	0.064	0.320	0.541	0.620	0.705	0.910	1.000	0.910	/
Ⅳ	0.048	0.257	0.489	0.610	0.700	0.955	1.000	0.897	/
Ⅴ	0.032	0.224	0.476	0.60	0.720	0.980	1.000	0.900	/

Ⅰ: 豫北种植区; Ⅱ: 豫东种植区; Ⅲ: 浅山丘陵盆地种植区; Ⅳ: 淮北平原、南阳盆地种植区; Ⅴ: 豫南稻茬麦区。Ⅰ: northern Henan planting area; Ⅱ: eastern Henan planting area; Ⅲ: shallow mountain hilly basin planting area; Ⅳ: Huaibei Plain and Nanyang Basin planting area; Ⅴ: southern Henan planting area.

$$f(p) = \begin{cases} 1 - K_y \times (1 - P/\mathrm{ET_m}) & (P < \mathrm{ET_m}) \\ 1 & (P > \mathrm{ET_m}) \end{cases} \tag{7}$$

$$\mathrm{ET_m} = K_1 \times \mathrm{ET_0} \tag{8}$$

式中: P 为降水量; K_y 为作物反应系数, 冬小麦取 1; K_1 为作物系数; $\mathrm{ET_0}$ 为参考作物蒸散量, 采用 FAO Penman-Monteith 公式计算; $\mathrm{ET_m}$ 为冬小麦生育期内实际蒸腾蒸发量。

1.2.2 产量差计算方法

将 AEZ 模型计算结果结合实际产量, 求差值得到各级产量差距。本文主要分析 3 个水平的产量差距: $\mathrm{YG_{1\text{-}2}}$、$\mathrm{YG_{2\text{-}3}}$ 和 $\mathrm{YG_{2\text{-}a}}$。$\mathrm{YG_{1\text{-}2}}$ 表征冬小麦生产潜力受温度变化对产量潜力发挥的影响; $\mathrm{YG_{2\text{-}3}}$ 表示降水变化对产量潜力发挥的影响; $\mathrm{YG_{2\text{-}a}}$ 用来反映研究区域范围内 14 个站点冬小麦实际产量与产量上限之间的距离, 反映气候条件和生产条件对实际产量的综合限制状况[16-17]。

1.3 数据来源

本研究气象数据来源于国家气象局数据中心, 包括河南省 14 个站点的 1961—2013 年的日平均气温、日最高气温、日最低气温、日降水量、日照时数、相对湿度、大气外太阳辐射通量、太阳时角、纬度等。河南省 1980—2013 年的冬小麦产量数据来源于河南省历年统计年鉴。

2　结果与分析

2.1　1981—2010 年河南省冬小麦大田平均产量

从河南省 14 个研究站点 1981—2010 年冬小麦平均单位面积产量(Y_a)看来，各县(市)平均产量存在很大差异(图 2)，1981—2010 年每 10 年平均产量(将每 10 年的平均值视作该阶段的产量状况)变化趋势表明，河南省冬小麦产量总体逐渐上升，其中 2001—2010 年产量增长最为明显。Ⅰ、Ⅱ区 1991—2000 年产量比 1981—1990 年明显增加; 除新乡和三门峡两个站点，其他站点 2001—2010 年产量比 1991—2000 年明显增加。

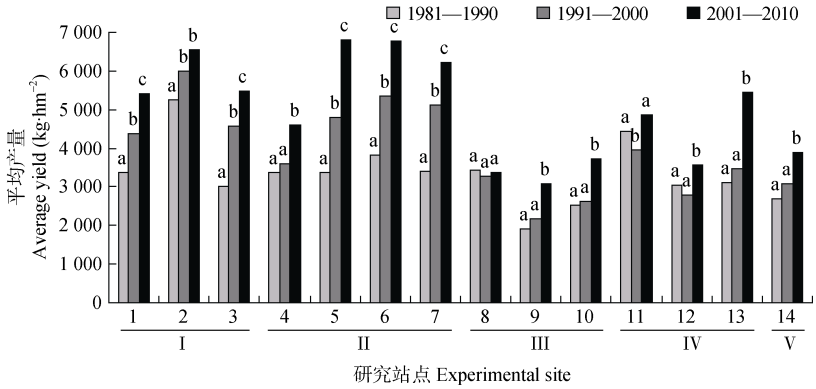

图 2　1981—2010 年河南省 5 个小麦气候区的 14 个站点冬小麦每 10 年平均产量

Fig. 2　Average yields of winter wheat per 10 years at 14 sites of five climatic areas of wheat in Henan Province in 1961–2010

1: 安阳; 2: 新乡; 3: 开封; 4: 宝丰; 5: 许昌; 6: 西华; 7: 商丘; 8: 三门峡; 9: 卢氏; 10: 栾川; 11: 南阳; 12: 西峡; 13: 驻马店; 14: 信阳。Ⅰ: 豫北种植区; Ⅱ: 豫东种植区; Ⅲ: 浅山丘陵盆地种植区; Ⅳ: 淮北平原、南阳盆地种植区; Ⅴ: 豫南稻茬麦区。同一站点不同小写字母表示不同时间段间在 0.05 水平差异显著。1: Anyang; 2: Xinxiang; 3: Kaifeng; 4: Baofeng; 5: Xuchang; 6: Xihua; 7: Shangqiu; 8: Sanmenxia; 9: Lushi; 10: Luanchuan; 11: Nanyang; 12: Xixia; 13: Zhumadian; 14: Xinyang. Ⅰ: northern Henan planting area; Ⅱ: eastern Henan planting area; Ⅲ: shallow mountain hilly basin planting area; Ⅳ: Huaibei Plain and Nanyang Basin planting area; Ⅴ: southern Henan planting area. Different lowercase letters at the same experimental site mean significant differences among decades.

2.2　1961—2013 年河南省冬小麦的生产潜力

2.2.1　光合生产潜力

图 3 表明，河南省 1961—2013 年冬小麦的光合生产潜力范围为 47 799.50~64 982.95 kg·hm^{-2}。14 个站点中，光合生产潜力年均值的最大值出现在Ⅰ区的新乡站点，最小值出现在Ⅴ区的信阳站点。造成该结果的原因是: Ⅰ区光温条件较好，全生育期日照时数为 1 400~1 500 h。连阴雨天气少，光照充足。而Ⅴ区主要包括淮河以南各县，即豫南稻茬麦区。该区小麦生育期前期光照充足，后期由于春季多雨，寡照明显。

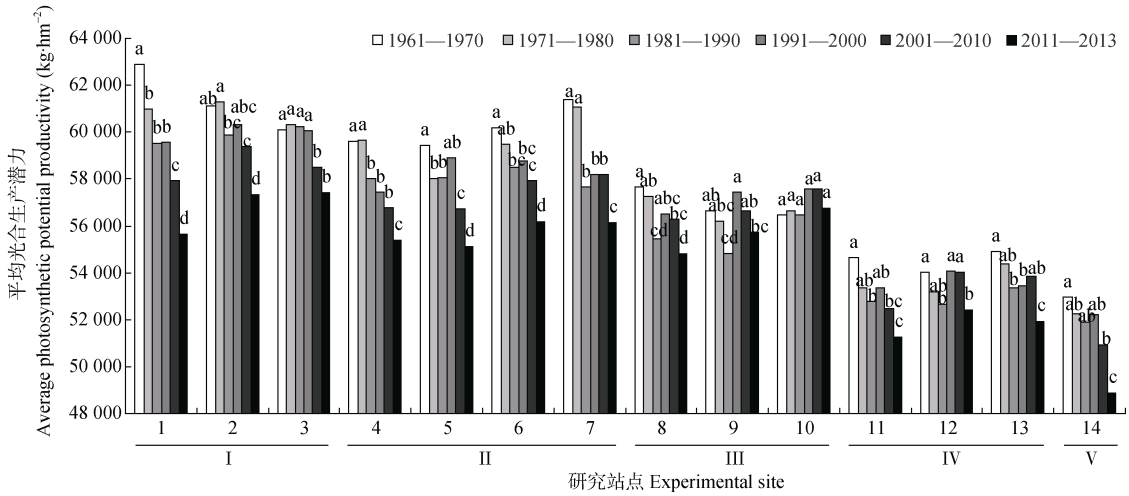

图 3　1961—2013 年河南省 5 个小麦气候区的 14 个站点冬小麦光合生产潜力

Fig. 3　Photosynthetic potential productivities (Y_1) of winter wheat at 14 sites of five climatic areas of wheat in Henan Province in 1961–2013

1: 安阳; 2: 新乡; 3: 开封; 4: 宝丰; 5: 许昌; 6: 西华; 7: 商丘; 8: 三门峡; 9: 卢氏; 10: 栾川; 11: 南阳; 12: 西峡; 13: 驻马店; 14: 信阳。Ⅰ: 豫北种植区; Ⅱ: 豫东种植区; Ⅲ: 浅山丘陵盆地种植区; Ⅳ: 淮北平原、南阳盆地种植区; Ⅴ: 豫南稻茬麦区。同一站点不同小写字母表示不同时间段间在 0.05 水平上差异显著。1: Anyang; 2: Xinxiang; 3: Kaifeng; 4: Baofeng; 5: Xuchang; 6: Xihua; 7: Shangqiu; 8: Sanmenxia; 9: Lushi; 10: Luanchuan; 11: Nanyang; 12: Xixia; 13: Zhumadian; 14: Xinyang. Ⅰ: northern Henan planting area; Ⅱ: eastern Henan planting area; Ⅲ: shallow mountain hilly basin planting area; Ⅳ: Huaibei Plain and Nanyang Basin planting area; Ⅴ: southern Henan planting area. Different lowercase letters at the same experimental site mean significant differences among decades.

光合生产潜力中 1971—1980 年比 1961—1970 年明显减少的站点为安阳、许昌，1981—1990 年光合生产潜力比 1971—1980 年明显减少的站点为新乡、宝丰、商丘、三门峡；1991—2000 年光合生产潜力比 1981—1990 年明显增加的站点为卢氏、西峡；2001—2010 年光合生产潜力比 1991—2000 年明显减少的站点为安阳、开封、许昌；除开封、卢氏、栾川、南阳其他站点 2011—2013 年光合生产潜力都比 2001—2010 年明显减少。

2.2.2 光温生产潜力

图 4 表明，河南省 1961—2013 年冬小麦光温生产潜力范围为 7 156.54~9 971.61 kg·hm^{-2}。光温生产潜力的年均值最大值出现在Ⅰ区的新乡站点，最小值出现在Ⅲ区的卢氏站点。造成该结果的原因是：Ⅰ区光温条件较好，冬季光照充足、温度适宜，对培育冬前壮苗以及安全越冬起到促进作用；而Ⅲ区由河南省西部以及西南部 700 m 以下的浅山丘陵地区组成。如果该区冬小麦适时播种，冬前温度适宜，降水充沛，有助于壮苗的培育和安全越冬；一旦播种偏晚，秋旱严重，会导致冬季死苗。生长后期日较差较大，对籽粒增重有正效应。春季干旱对小麦形成穗粒有限制作用，因此该区主要依靠小麦穗数来争取产量。光温生产潜力中 1971—1980 年开封站点比 1961—1970 年明显增加；1981—1990 年宝丰、许昌、商丘、卢氏、驻马店站点的光温生产潜力比 1971—1980 年明显减少；1991—2000 年新乡、许昌、西华、商丘、卢氏、西峡站点的光温生产潜力比 1981—1990 年明显增加；2001—2010 年光温生产潜力驻马店站点比 1991—2000 年明显增加，2011—2013 年新乡、许昌、商丘、驻马店、信阳站点的光温生产潜力比 2001—2010 年明显减少。全球变暖现象使 14 个站点光温生产潜力值均呈增长趋势，其中增长趋势最明显的是开封站点，最不明显的是安阳站点。

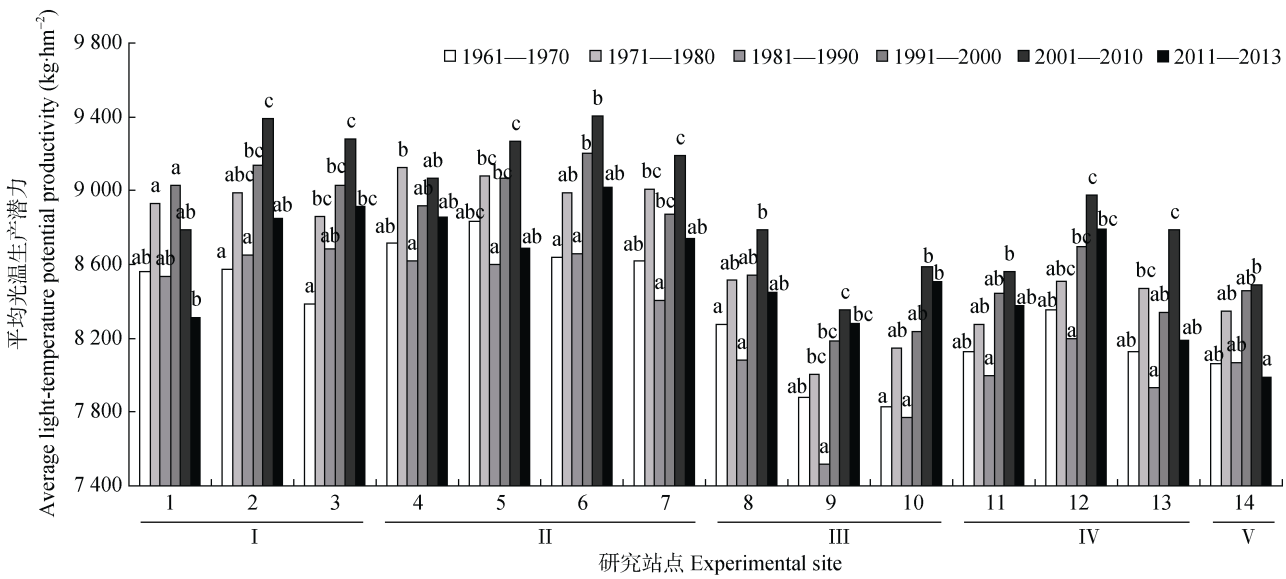

图 4 1961—2013 年河南省 5 个小麦气候区的 14 个站点冬小麦光温生产潜力

Fig. 4 Light-temperature potential productivities (Y_2) of winter wheat at 14 sites of five climatic areas of wheat in Henan Province in 1961–2013

1: 安阳; 2: 新乡; 3: 开封; 4: 宝丰; 5: 许昌; 6: 西华; 7: 商丘; 8: 三门峡; 9: 卢氏; 10: 栾川; 11: 南阳; 12: 西峡; 13: 驻马店; 14: 信阳。Ⅰ: 豫北种植区; Ⅱ: 豫东种植区; Ⅲ: 浅山丘陵盆地种植区; Ⅳ: 淮北平原、南阳盆地种植区; Ⅴ: 豫南稻茬麦区。同一站点不同小写字母表示不同时间段间在 0.05 水平上差异显著。1: Anyang; 2: Xinxiang; 3: Kaifeng; 4: Baofeng; 5: Xuchang; 6: Xihua; 7: Shangqiu; 8: Sanmenxia; 9: Lushi; 10: Luanchuan; 11: Nanyang; 12: Xixia; 13: Zhumadian; 14: Xinyang. Ⅰ: northern Henan planting area; Ⅱ: eastern Henan planting area; Ⅲ: shallow mountain hilly basin planting area; Ⅳ: Huaibei Plain and Nanyang Basin planting area; Ⅴ: southern Henan planting area. Different lower-case letters at the same experimental site mean significant differences among decades.

2.2.3 气候生产潜力

图 5 表明，河南省 1961—2013 年冬小麦气候生产潜力范围在 1 034.23~9 416.88 kg·hm^{-2}。气候生产潜力的年均值最大值出现在Ⅴ区的信阳站点，最小值出现在Ⅰ区的安阳站点。造成该结果的原因是：Ⅴ区小麦全生育期降水量为 400~500 mm，冬季温暖，雨量多，越冬条件好，春季多雨。而Ⅰ区由于自然降水量小，小麦拔节抽穗期春旱机率较高。全生育期内降水量 150~200 mm，严重小于实际需水量。生长后期干热风灾害严重，是省内重要干热风区。14 个站点 53 年内气候生产潜力无明显变化。

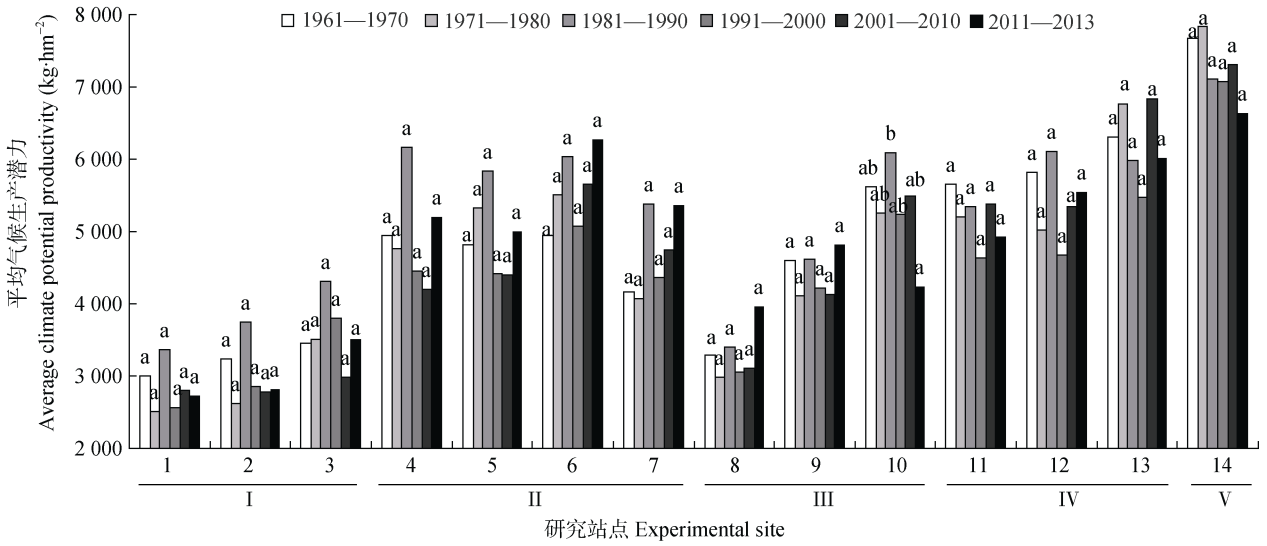

图 5　1961—2013 年河南省 5 个小麦气候区的 14 个站点冬小麦气候生产潜力

Fig. 5　Climate potential productivities (Y_3) of winter wheat at 14 sites of five climatic areas of wheat in Henan Province in 1961–2013

1: 安阳; 2: 新乡; 3: 开封; 4: 宝丰; 5: 许昌; 6: 西华; 7: 商丘; 8: 三门峡; 9: 卢氏; 10: 栾川; 11: 南阳; 12: 西峡; 13: 驻马店; 14: 信阳。Ⅰ: 豫北种植区; Ⅱ: 豫东种植区; Ⅲ: 浅山丘陵盆地种植区; Ⅳ: 淮北平原、南阳盆地种植区; Ⅴ: 豫南稻茬麦区。同一站点不同小写字母表示不同时间段间在 0.05 水平上差异显著。1: Anyang; 2: Xinxiang; 3: Kaifeng; 4: Baofeng; 5: Xuchang; 6: Xihua; 7: Shangqiu; 8: Sanmenxia; 9: Lushi; 10: Luanchuan; 11: Nanyang; 12: Xixia; 13: Zhumadian; 14: Xinyang. Ⅰ: northern Henan planting area; Ⅱ: eastern Henan planting area; Ⅲ: shallow mountain hilly basin planting area; Ⅳ: Huaibei Plain and Nanyang Basin planting area; Ⅴ: southern Henan planting area. Different lower-case letters at the same experimental site mean significant differences among decades.

2.3　1961—2013 年河南省冬小麦的产量差

2.3.1　光合生产潜力与光温生产潜力的差距(YG_{1-2})

光合与光温生产潜力差距(YG_{1-2})表示研究区域内有效热量条件对冬小麦光合生产潜力的限制。经过计算, 14 个站点的 YG_{1-2} 多年平均值最大值出现在Ⅰ区的新乡站点, 最小值出现在Ⅴ区的信阳站点。其时间分布图(图 6)可以看出, 河南省冬小麦 YG_{1-2} 差距总体呈现出递减趋势, 其中 1971—1980 年 YG_{1-2} 差距比 1961—1970 年明显减少的站点为安阳、许昌、南阳、西峡; 1981—1990 年 YG_{1-2} 差距比 1971—1980 年明显减少的站点为商丘、三门峡; 1991—2000 年 YG_{1-2} 差距比 1981—1990 年明显增加的站点为卢氏; 2001—2010 年 YG_{1-2} 差距比 1991—2000 年明显减少的站点为安阳、新乡、开封、许昌、南阳、信阳。从 YG_{1-2} 差距空间分布图(图 7)可以看出, 河南省冬小麦 YG_{1-2} 差距自北向南递减, 说明河南热量条件对当地冬小麦光合生产潜力的限制由北向南减小。

2.3.2　光温生产潜力与气候生产潜力的差距(YG_{2-3})

光温与气候生产潜力差距(YG_{2-3})体现了研究区域内降雨量对冬小麦光温生产潜力的制约程度, YG_{2-3} 值越大表示水分亏缺对产量的影响越大。经计算, 14 个站点的 YG_{2-3} 多年平均值最大值出现在Ⅰ区的新乡站点, 最小值出现在Ⅴ区的信阳站点。其时间分布图(图 8)可以看出, 河南省冬小麦 YG_{2-3} 差距呈现出“Ⅴ型”, 谷值在 1981—1990 年, 且 14 个站点 53 年内无明显变化; 从 YG_{2-3} 差距分布图(图 9)可以看出, 河南省冬小麦 YG_{2-3} 差距自北向南递减, 说明河南降水条件对当地冬小麦光温生产潜力的限制由北向南减小。

2.3.3　光温生产潜力与大田平均产量的差距(YG_{2-a})

光温生产潜力与大田平均产量的差距(YG_{2-a})可以体现研究区域内 14 个站点冬小麦产量上限与实际产量之间的差, 表征气候以及生产条件对实际产量的综合制约程度。由于获得的大田平均产量数据有限, 本文只计算了 1981—2011 年的 YG_{2-a} 值。14 个站点的 YG_{2-a} 年平均值最大值出现在Ⅲ区的卢氏站点, 最小值出现在Ⅰ区的新乡站点。其时间分布图(图 10)可以看出, 1991—2000 年 YG_{2-a} 差距比 1981—1990 年明显减少的站点为开封、许昌、西华、商丘, 明显增加的站点为南阳、西峡; 2001—2010 年除新乡、商丘、三门峡、西峡, 其他站点的 YG_{2-a} 差距都比 1991—2000 年明显减少。从 YG_{2-a} 差距分布图(图 11)可以看出, 河南省冬小麦 YG_{2-a} 差距Ⅰ区<Ⅱ区<Ⅳ区<Ⅴ区<Ⅲ区, 自东向西递增, 说明气候以及生产条件对实际产量的共同限制自东向西增加。

3　结论与讨论

本研究在产量差变化趋势方面与叶冠宁等[20]和余

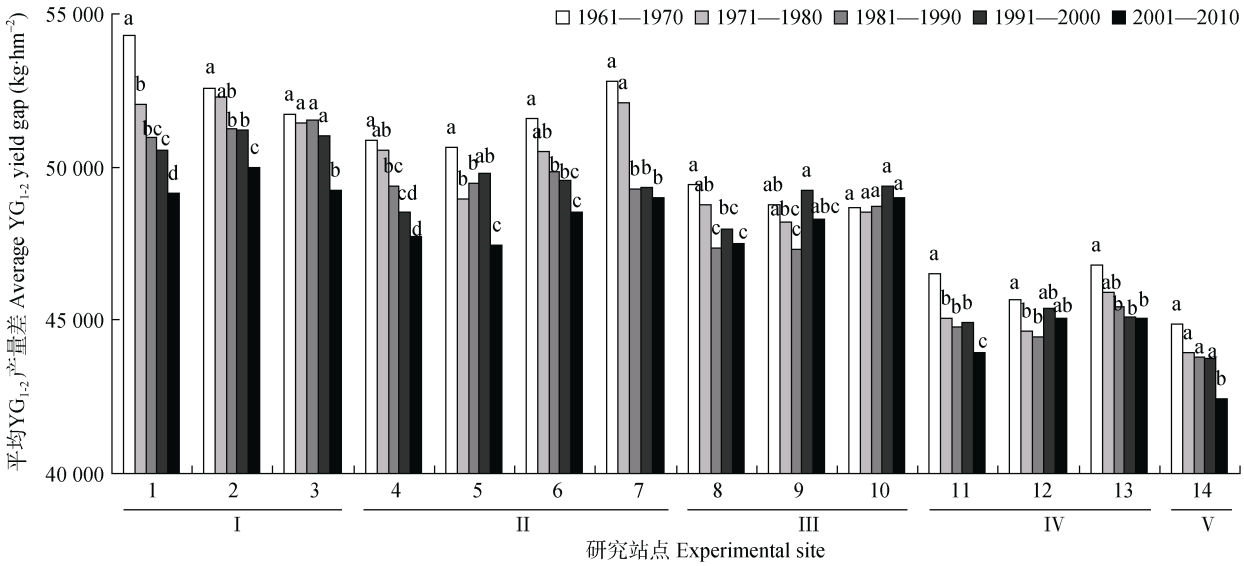

图 6 1961—2010 年河南省 5 个小麦气候区的 14 个站点冬小麦每 10 年平均光合生产潜力与光温生产潜力差距(YG_{1-2})

Fig. 6 Average gaps between photosynthetic potential productivity and light-temperature potential productivity light-temperature potential productivity (YG_{1-2}) of winter wheat every 10 years at 14 sites of five climatic areas of wheat in Henan Province in 1961–2010

1: 安阳; 2: 新乡; 3: 开封; 4: 宝丰; 5: 许昌; 6: 西华; 7: 商丘; 8: 三门峡; 9: 卢氏; 10: 栾川; 11: 南阳; 12: 西峡; 13: 驻马店; 14: 信阳。Ⅰ: 豫北种植区; Ⅱ: 豫东种植区; Ⅲ: 浅山丘陵盆地种植区; Ⅳ: 淮北平原、南阳盆地种植区; Ⅴ: 豫南稻茬麦区。同一站点不同小写字母表示不同时间段间在 0.05 水平上差异显著。1: Anyang; 2: Xinxiang; 3: Kaifeng; 4: Baofeng; 5: Xuchang; 6: Xihua; 7: Shangqiu; 8: Sanmenxia; 9: Lushi; 10: Luanchuan; 11: Nanyang; 12: Xixia; 13: Zhumadian; 14: Xinyang. Ⅰ: northern Henan planting area; Ⅱ: eastern Henan planting area; Ⅲ: shallow mountain hilly basin planting area; Ⅳ: Huaibei Plain and Nanyang Basin planting area; Ⅴ: southern Henan planting area. Different lowercase letters at the same experimental site mean significant differences among decades.

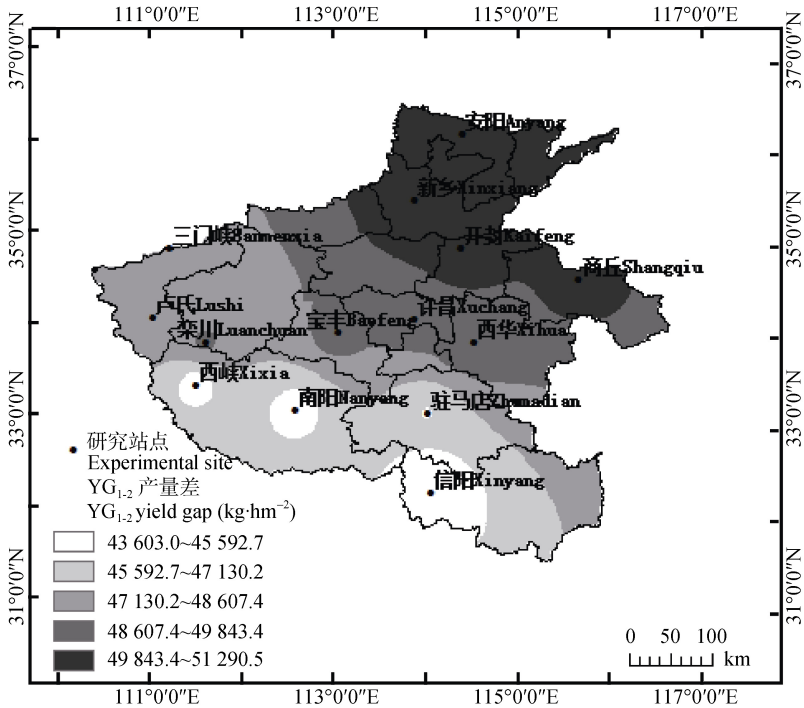

图 7 1961—2010 年河南省每 10 年光合生产潜力与光温生产潜力差距(YG_{1-2})分布图

Fig. 7 Spatial distribution of average gap between photosynthetic potential productivity and light-temperature potential productivity (YG_{1-2}) of winter wheat every 10 years at 14 sites of wheat in Henan Province in 1961–2010

卫东等[21]研究结果具有较好的一致性。王学强等[22]虽然同样用 AEZ 模型计算了河南省冬小麦生产潜力及其开发度，但本研究与之不同的是将河南省划分为 5 个区域，还按不同区域划分生育期，计算结果更为精确；王学强等[22]将生产潜力开发度(气候生产潜力与实际产量的比值)作为研究冬小麦生产潜力开

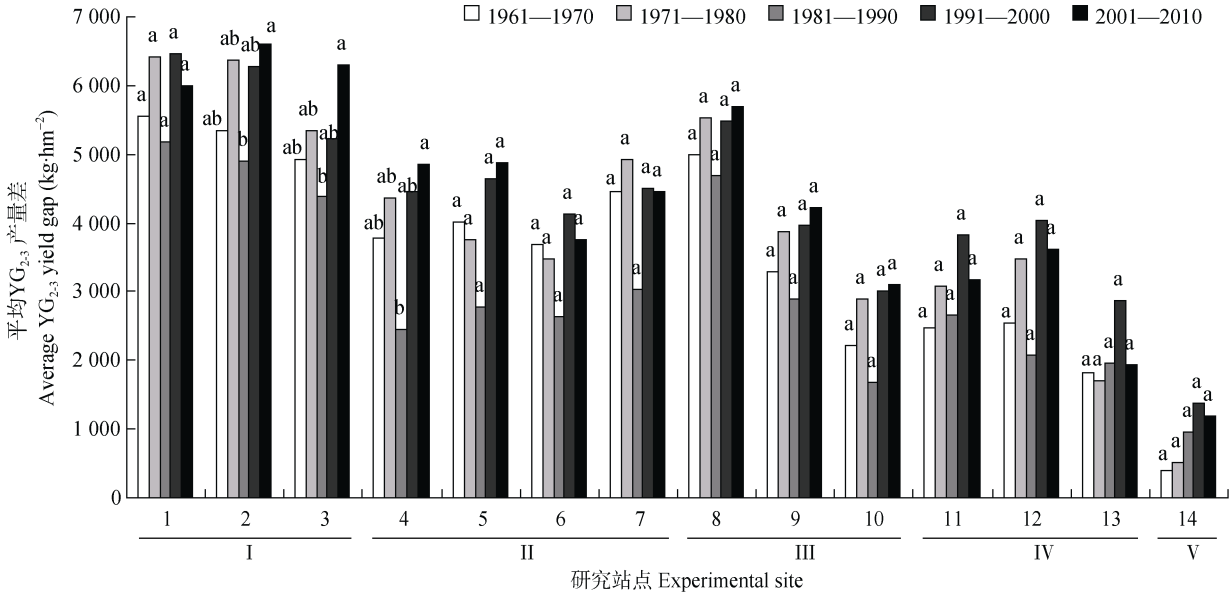

图 8　1961—2010 年河南省 5 个小麦气候区的 14 个站点冬小麦每 10 年平均光温生产潜力与气候生产潜力的差距($YG_{2\text{-}3}$)

Fig. 8　Average gaps between light-temperature potential productivity and climate potential productivity ($YG_{2\text{-}3}$) of winter wheat every 10 years at 14 sites of five climatic areas of wheat in Henan Province in 1961—2010

1: 安阳; 2: 新乡; 3: 开封; 4: 宝丰; 5: 许昌; 6: 西华; 7: 商丘; 8: 三门峡; 9: 卢氏; 10: 栾川; 11: 南阳; 12: 西峡; 13: 驻马店; 14: 信阳。Ⅰ: 豫北种植区; Ⅱ: 豫东种植区; Ⅲ: 浅山丘陵盆地种植区; Ⅳ: 淮北平原、南阳盆地种植区; Ⅴ: 豫南稻茬麦区。同一站点不同小写字母表示不同时间段间在 0.05 水平上差异显著。1: Anyang; 2: Xinxiang; 3: Kaifeng; 4: Baofeng; 5: Xuchang; 6: Xihua; 7: Shangqiu; 8: Sanmenxia; 9: Lushi; 10: Luanchuan; 11: Nanyang; 12: Xixia; 13: Zhumadian; 14: Xinyang. Ⅰ: northern Henan planting area; Ⅱ: eastern Henan planting area; Ⅲ: shallow mountain hilly basin planting area; Ⅳ: Huaibei Plain and Nanyang Basin planting area; Ⅴ: southern Henan planting area. Different lower-case letters at the same experimental site mean significant differences among decades.

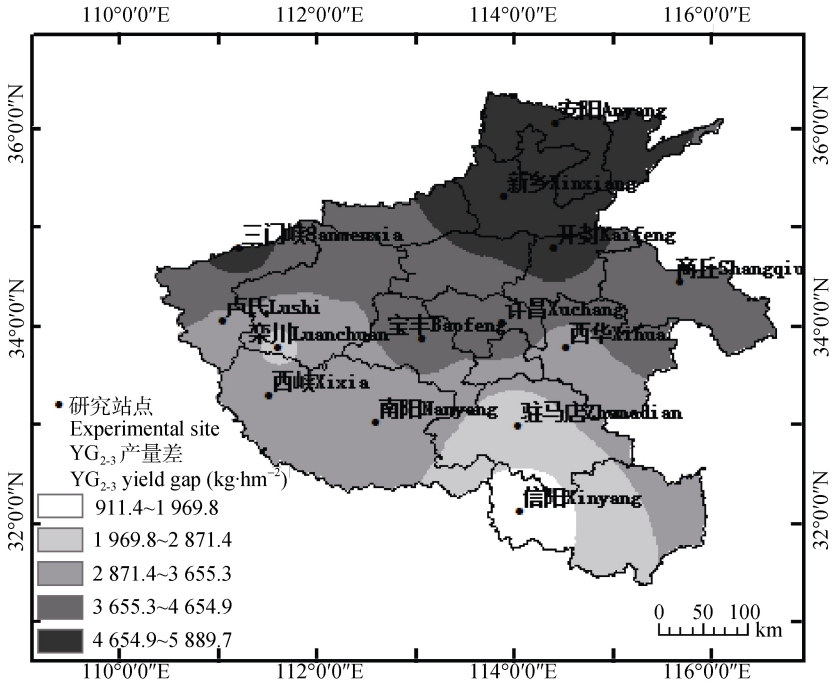

图 9　1961—2010 年河南省每 10 年光温生产潜力与气候生产潜力差距($YG_{2\text{-}3}$)分布图

Fig. 9　Spatial distribution of average gap between light-temperature potential productivity and climate potential productivity ($YG_{2\text{-}3}$) of winter wheat every 10 years at 14 sites in Henan Province in 1961–2010

发程度的指标, 而本研究却使用 3 个不同的指标进行研究; 王学强等[22]着重在典型年份做了分析, 本研究既对时间的变化趋势做了分析, 又对空间分布做了分析。余卫东等[23]利用逐步订正模型, 计算分析了近 50 年河南省夏玉米光温生产潜力与气候生产潜力、光温生产潜力与实际产量两种产量差的时

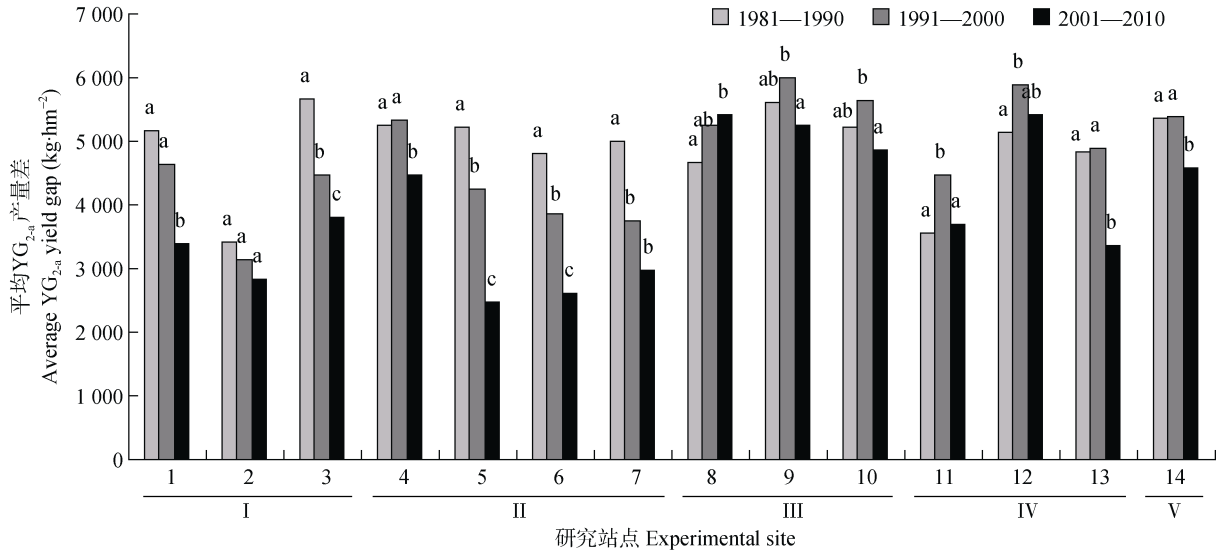

图 10 1961—2010 年河南省 5 个小麦气候区的 14 个站点冬小麦每 10 年平均光温生产潜力与大田平均产量的差距(YG_{2-a})

Fig. 10 Average gaps between light-temperature potential productivity and actual yield (YG_{2-a}) of winter wheat every 10 years at 14 sites of five climatic regions of wheat in Henan Province in 1961–2010

1: 安阳; 2: 新乡; 3: 开封; 4: 宝丰; 5: 许昌; 6: 西华; 7: 商丘; 8: 三门峡; 9: 卢氏; 10: 栾川; 11: 南阳; 12: 西峡; 13: 驻马店; 14: 信阳。Ⅰ: 豫北种植区; Ⅱ: 豫东种植区; Ⅲ: 浅山丘陵盆地种植区; Ⅳ: 淮北平原、南阳盆地种植区; Ⅴ: 豫南稻茬麦区。同一站点不同小写字母表示不同时间段间在 0.05 水平上差异显著。1: Anyang; 2: Xinxiang; 3: Kaifeng; 4: Baofeng; 5: Xuchang; 6: Xihua; 7: Shangqiu; 8: Sanmenxia; 9: Lushi; 10: Luanchuan; 11: Nanyang; 12: Xixia; 13: Zhumadian; 14: Xinyang. Ⅰ: northern Henan planting area; Ⅱ: eastern Henan planting area; Ⅲ: shallow mountain hilly basin planting area; Ⅳ: Huaibei Plain and Nanyang Basin planting area; Ⅴ: southern Henan planting area. Different lower-case letters at the same experimental site mean significant differences among decades.

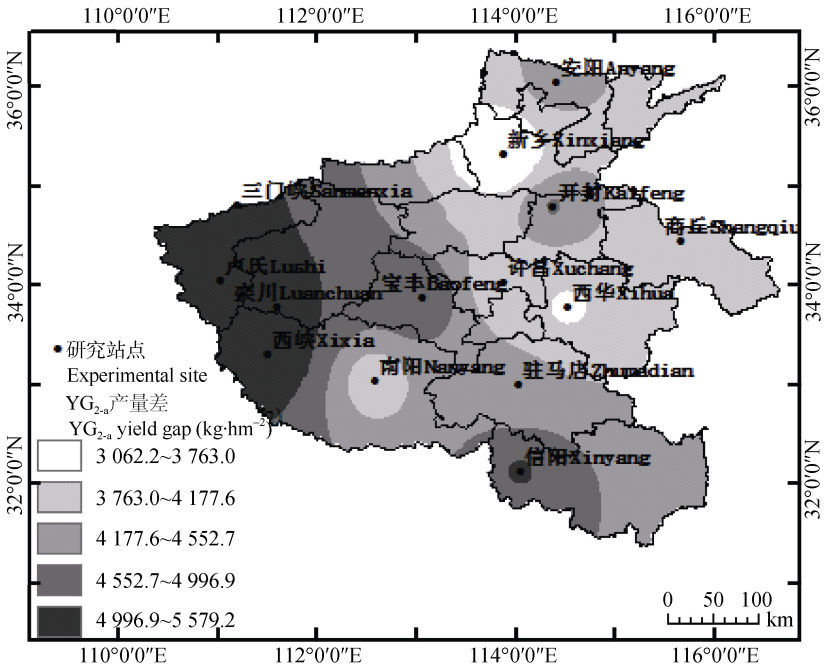

图 11 1961—2010 年河南省每 10 年光温生产潜力与大田平均产量的差距(YG_{2-a})分布图

Fig. 11 Spatial distribution of average gap between light-temperature potential productivity and actual yield (YG_{2-a}) of winter wheat every 10 years at 14 sites in Henan Province in 1961–2010

空变化特征。本研究与之相同的地方在于：都选用了模型计算作物生产潜力以及产量差；都对时空变化特征做了分析。不同的是：本文选用的是 AEZ 模型，而余卫东等[21]选择的是逐步订正模型；本文对研究区域进行了划分，使计算结果更为精确。本研究存在不足：河南省一些地区存在补充灌溉，但本研究中没有把补充灌溉这部分算进气候生产潜力中，这会造成灌溉地区的 YG_{2-3} 值偏大，今后将会针对上述

问题进一步开展工作, 使研究结果更精确。

本文研究结果显示: 由于 1961—2013 年冬小麦生育期内日照时数减少[24], 导致该省冬小麦光合生产潜力下降; 而温度的升高[25]促进了冬小麦光温生产潜力的提高; 气候生产潜力基本不变。对大田平均产量的分析表明, 河南省 14 个站点平均产量存在较大差异, 河南省冬小麦产量总体逐渐增长。近 30 年来, 大田平均产量增长明显而气候生产潜力却基本不变。该现象主要由以下因素导致: 冬小麦品种的改良更新、现代农业生产技术的不断提升、农药化肥的合理使用、优质小麦区域化布局渐趋合理等。从时间变化上看, 河南省冬小麦 $YG_{1\text{-}2}$ 差距总体呈现出递减趋势; $YG_{2\text{-}3}$ 差距呈现出“V 型”, 谷值在 1981—1990 年; Ⅰ、Ⅱ、Ⅴ区 $YG_{2\text{-}a}$ 差距呈现递减趋势, 而Ⅲ和Ⅳ区则呈现先增加再减少的趋势。从空间变化上看, 由于全省地理环境的区域差异性, 特别是以气候为主导因素的南北分异和以地质地貌为主导因素的东西分异, 河南省冬小麦 3 个水平产量差距各不相同。冬小麦 $YG_{1\text{-}2}$ 差距自北向南递减, 说明河南热量条件对当地冬小麦光合生产潜力的限制由北向南减小; $YG_{2\text{-}3}$ 差距自北向南递减, 说明河南降水条件对该区域冬小麦光温生产潜力的制约由北向南减小, 该现象符合河南省降水“南丰北缺”的空间分布特点; 河南省冬小麦 $YG_{2\text{-}a}$ 差距自东向西递增, 说明气候条件和生产条件对实际产量的综合限制自东向西增加, 符合河南省人口、经济呈现不均衡的分布特点, 重点体现在东部人口密度以及经济水平皆高于西部。

依据上述研究结果, 本研究针对河南省不同区域缩小产量差提出以下建议: Ⅰ区由于地处河南省最北端, 温度以及降水条件较差, 因此补充灌溉可以缩小产量差, 与此同时, Ⅰ区的西南部分还需要优化种植管理制度。Ⅱ区的人口密度较大, 经济发展较好, 农业生产技术也较为先进, 因此需优化管理制度, 精益求精。Ⅲ区地处浅山丘陵盆地, 地力和地形对产量制约较大; 而且该区人口密度低, 经济较为落后, 可以通过政府扶持, 提高种植技术, 加大化肥施用量和灌溉量, 优化管理制度来缩小该区产量差。Ⅳ区的温度及降水条件较好, 土壤肥力较差, 若要缩小产量差, 需要将有机肥和无机肥相结合。Ⅴ区由于温度较高, 降水量较大, 土壤肥力较低, 更适宜种植水稻。因此合理规划种植作物品种对该区缩小产量差具有重要影响。

参考文献 References

[1] 王志敏. 迈向新的绿色革命——全球粮食高产研究动向[J]. 中国农业科技导报, 2004, 6(4): 3–9
WANG Z M. Towards new green-revolution-global prospects of grain high-yield research[J]. Review of China Agricultural Science and Technology, 2004, 6(4): 3–9

[2] 刘巽浩, 胡跃高, 陈阜. 粮食——中国农业的永恒难题与主题[J]. 农业现代化研究, 2010, 31(4): 385–391
LIU X H, HU Y G, CHEN F. The problem of cereals: Eternal theme and difficult problem of Chinese agriculture[J]. Research of Agricultural Modernization, 2010, 31(4): 385–391

[3] 王馥棠. 近十年来我国气候变暖影响研究的若干进展[J]. 应用气象学报, 2002, 13(6): 755–766
WANG F T. Advances in climate warming impact research in China in recent ten years[J]. Journal of Applied Meteorological Science, 2002, 13(6): 755–766

[4] 王馥棠, 赵宗慈, 王石立, 等. 气候变化对农业生态的影响[M]. 北京: 气象出版社, 2003: 6–11
WANG F T, ZHAO Z C, WANG S L, et al. Effects of Climatic Change on Agricultural Ecology[M]. Beijing: Meteorological Press, 2003: 6–11

[5] 《气候变化国家评估报告》编写委员会. 气候变化国家评估报告[M]. 北京: 科学出版社, 2007: 23–29
Committee of “China’s National Assessment Report on Climate Change”. China’s National Assessment Report on Climate Change[M]. Beijing: Science Press, 2007: 23–29

[6] 刘保花, 陈新平, 崔振岭, 等. 三大粮食作物产量潜力与产量差研究进展[J]. 中国生态农业学报, 2015, 23(5): 525–534
LIU B H, CHEN X P, CUI Z L, et al. Research advance in yield potential and yield gap of three major cereal crops[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2015, 23(5): 525–534

[7] 刘志娟, 杨晓光, 吕硕, 等. 东北三省春玉米产量差时空分布特征[J]. 中国农业科学, 2017, 50(9): 1606–1616
LIU Z J, YANG X G, LYU S, et al. Spatial-temporal variations of yield gaps of spring maize in Northeast China[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2017, 50(9): 1606–1616

[8] 刘建刚, 王宏, 石全红, 等. 基于田块尺度的小麦产量差及生产限制因素解析[J]. 中国农业大学学报, 2013, 17(2): 42–47
LIU J G, WANG H, SHI Q H, et al. Analysis of yield gap and limiting factors for wheat on the farmland[J]. Journal of China Agricultural University, 2013, 17(2): 42–47

[9] 梅旭荣, 康绍忠, 于强, 等. 协同提升黄淮海平原作物生产力与农田水分利用效率途径[J]. 中国农业科学, 2013, 46(6): 1149–1157
MEI X R, KANG S Z, YU Q, et al. Pathways to synchronously improving crop productivity and field water use efficiency in the North China Plain[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2013, 46(6): 1149–1157

[10] 赵文亮, 贺振, 贺俊平, 等. 基于 MODIS-NDVI 的河南省冬小麦产量遥感估测[J]. 地理研究, 2012, 31(12): 2310–2320
ZHAO W L, HE Z, HE J P, et al. Remote sensing estimation for winter wheat yield in Henan based on the MODIS-NDVI

data[J]. Geographical Research, 2012, 31(12): 2310–2320

[11] 周磊, 李刚, 贾德伟, 等. 基于光能利用率模型的河南省冬小麦单产估算研究[J]. 中国农业资源与区划, 2017, 38(6): 108–115
ZHOU L, LI G, JIA D W, et al. Yield estimation of winter wheat in Henan Province based on the vegetation photosynthesis model[J]. Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning, 2017, 38(6): 108–115

[12] 李彤霄, 赵国强, 李有. 河南省气候变化及其对冬小麦越冬期的影响[J]. 中国农业气象, 2009, 30(1): 143–146
LI T X, ZHAO G Q, LI Y. Climate change and its impacts on duration of winter wheat overwintering stage in Henan Province[J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 2009, 30(1): 143–146

[13] 成林, 薛昌颖, 李彤霄, 等. 河南省稻麦类作物对气候变化的响应[J]. 气象与环境科学, 2010, 33(3): 6–10
CHENG L, XUE C Y, LI T X, et al. Responses of wheat and rice crops to climate change in Henan Province[J]. Meteorological and Environmental Sciences, 2010, 33(3): 6–10

[14] 王存凯, 陈鹏飞, 陶洪斌, 等. 玉米产量潜力及超高产物质积累途径优化分析方法[J]. 中国生态农业学报, 2014, 22(12): 1414–1423
WANG C K, CHEN P F, TAO H B, et al. Optimized FAO-AEZ model for estimation of maize yield potential and dry matter accumulation for super-high yield cultivation[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2014, 22(12): 1414–1423

[15] 杨改河. 西藏土地资源生产能力及人口承载量研究[M]. 拉萨: 西藏人民出版社, 1996: 78–79
YANG G H. Study on Land Resources Production Capacity and Population Carrying Capacity in Tibet[M]. Lhasa: Tibet People's Publishing House, 1996: 78–79

[16] 郑娜, 刘秀位, 王锡平. 利用产量差距方法进行华北冬小麦产量受气候影响规律的分析——以河北省栾城县为例[J]. 中国生态农业学报, 2014, 22(2): 234–240
ZHENG N, LIU X W, WANG X P. Determining the effects of climate on winter wheat yield in Northern China via yield gap analysis — A case study of Luancheng County, Hebei Province[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2014, 22(2): 234–240

[17] 王静, 杨晓光, 吕硕, 等. 黑龙江省春玉米产量潜力及产量差的时空分布特征[J]. 中国农业科学, 2012, 45(10): 1914–1925
WANG J, YANG X G, LYU S, et al. Spatial-temporal characteristics of potential yields and yield gaps of spring maize in Heilongjiang Province[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2012, 45(10): 1914–1925

[18] 成林, 刘荣花, 马志红. 增温对河南省冬小麦产量的影响分析[J]. 中国生态农业学报, 2011, 19(4): 854–859
CHENG L, LIU R H, MA Z H. Influence of global warming on winter wheat yield in Henan Province[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2011, 19(4): 854–859

[19] 范磊, 胡海燕, 王来刚, 等. 基于农户数据的河南中东部地区气象因子对冬小麦产量的影响分析[J]. 中国农业气象, 2012, 33(1): 109–113
FAN L, HU H Y, WANG L G, et al. Impact of meteorological factors on winter wheat yield in middle and east Henan Province based on household data[J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 2012, 33(1): 109–113

[20] 叶冠宁, 王淑香, 姚岩龙, 等. 河南冬小麦如何应对气候变化的响应探讨[J]. 气象与现代农业发展, 2012, 32(2): 103–170
YE G N, WANG S X, YAO Y L, et al. Response of winter wheat to climate change in Henan[J]. Meteorology and the Development of Modern Agriculture, 2012, 32(2): 103–170

[21] 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 W D, ZHAO G Q, CHEN H L. Impacts of climate change on growing stages of main crops in Henan Province[J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 2007, 28(1): 9–12

[22] 王学强, 贾志宽, 李轶冰. 基于 AEZ 模型的河南小麦生产潜力研究[J]. 西北农林科技大学学报: 自然科学版, 2008, 36(7): 85–90
WANG X Q, JIA Z K, LI Y B. Evaluations on the productive potential of wheat based on AEZ model in Henan Province[J]. Journal of Northwest A&F University: Natural Science Edition, 2008, 36(7): 85–90

[23] 余卫东, 马志红. 近 50 年河南省夏玉米生产潜力及产量差时空变化特征[J]. 干旱地区农业研究, 2015, 33(1): 205–212
YU W D, MA Z H. Temporal-spatial variation of yield potential and yield gaps of summer maize during the past 50 years in Henan Province[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2015, 33(1): 205–212

[24] 杨溯, 石广玉, 王标, 等. 1961—2009 年我国地面太阳辐射变化特征及云对其影响的研究[J]. 大气科学, 2013, 37(5): 963–970
YANG S, SHI G Y, WANG B, et al. Trends in surface solar radiation (SSR) and the effect of clouds on SSR during 1961–2009 in China[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2013, 37(5): 963–970

[25] 赵宗慈, 罗勇, 王绍武, 等. 全球变暖中的科学问题[J]. 气象与环境学报, 2015, 31(1): 1–5
ZHAO Z C, LUO Y, WANG S W, et al. Science issues on global warming[J]. Journal of Meteorology and Environment, 2015, 31(1): 1–5