

DOI: 10.13718/j.cnki.xdzk.2017.12.001

1961—2010 年四川盆地冬小麦需水量时空变化^①

庞艳梅¹, 陈超^{2,3}, 潘学标⁴

1. 中国气象局成都高原气象研究所/高原与盆地暴雨旱涝灾害四川省重点实验室, 成都 610072;
2. 四川省气候中心, 成都 610072; 3. 南方丘区节水农业研究四川省重点实验室, 成都 610066;
4. 中国农业大学 资源与环境学院, 北京 100193

摘要: 为了给四川麦区的农业用水提供指导, 采用四川盆地 1961—2010 年 104 个气象观测站的气象数据及 1981—2010 年 17 个农气站的冬小麦生育期数据, 利用参考作物蒸散量法以及作物系数法分析冬小麦各生育期内的需水量和水分盈亏情况。结果显示: 50 年间四川盆地冬小麦整个生育期的降水量有增有减, 但需水量和缺水量以下降趋势为主; 需水量在播种至开花期下降, 而在开花至成熟期有增有减; 缺水量在各个生育期内均呈下降趋势。5 个区域内的冬小麦整个生育期水分均不能得到满足, 尤以拔节至开花期最为严重。分析各区域代表站点冬小麦的水分状况, 盆地周边冬小麦的缺水最为严重。

关键词: 气候变化, 冬小麦, 需水量, 时空变化

中图分类号: S512.1

文献标志码: A

文章编号: 1673-9868(2017)12-0001-11

伴随社会的发展以及环境和气候的改变, 水资源已经很难满足人民生活和工农业生产需求, 因此, 怎样合理开发并利用自然降水从而提高水资源利用效率已经成为当前的一个热点话题。大量研究指出, 近年来四川省气候资源和农业气候资源均发生了明显的改变^[1-5], 蒸散、降水以及径流的变化使得作物发育及产量形成发生了变化^[6-7]; 主要作物的需水量^[8-14]以及水分盈亏状况^[15-16]变化显著。前人针对各地冬小麦需水量开展了大量的工作, 刘晓英等研究指出冬小麦对气候变暖的适应能力很差, 当生长期温度上升 1~4 °C 时, 冬小麦需水量将增加 2.6%~28.2%^[9]; 刘晓英等还指出华北冬小麦在 1961—2001 年需水量呈下降趋势, 且需水量下降的主要原因是日照与风速的减小^[10]; 曹红霞等研究表明 1961—2001 年关中冬小麦需水量的变化趋势不一致^[11]; 杨晓琳等认为 1960—2009 年黄淮海地区冬小麦生育期需水量呈下降趋势, 且主要原因是由于太阳辐射量下降^[12]; 刘钰等指出 1960—2009 年全国冬小麦种植区主要是河南、山东、河北、安徽、江苏、陕西、甘肃、新疆和山西等地, 全生育期需水量在 200~550 mm, 且从南向北逐渐增大^[13]; 孙爽等研究表明中国 1961—2010 年冬小麦需水量除了返青至拔节期外, 均呈现东南低、西北高的分布, 且各生育期的冬小麦需水量呈下降趋势, 以开花至成熟期下降最显著^[14]。

① 收稿日期: 2016-09-13

基金项目: 中国气象局西南区域重大科研业务项目(2014-08); 四川省“三农”气象服务专项; 中国气象局成都高原气象研究所基本科研业务项目(BROP201513)。

作者简介: 庞艳梅(1983-), 女, 北京人, 工程师, 主要从事气候变化对农业的影响评价研究。

通信作者: 陈超, 博士, 高级工程师。

本研究利用 1961—2010 年四川盆地冬小麦种植区内 104 个气象观测站的气象数据以及 1981—2010 年 17 个农气站冬小麦各生育阶段观测数据, 探讨冬小麦各生育阶段以及整个生育期需水量的时空分布特征, 并与降水量相结合分析各生育期冬小麦的水分盈亏状况. 研究将为当地调整作物种植结构、合理利用水资源以及提出适应气候变化的措施提供参考.

1 研究区域概况、数据来源与研究方法

1.1 研究区域概况

四川地处中纬度、亚热带地区, 由于复杂的地形和不同季风环流的交替影响, 气候复杂多样. 东部盆地属亚热带湿润气候; 西部高原在地形作用下, 以垂直气候带为主, 从南部山地到北部高原, 由亚热带演变到亚寒带, 垂直方向上由亚热带到永冻带的各种气候类型. 本研究选取四川盆地部分地区为研究区域, 也是四川冬小麦的主产区(图 1).

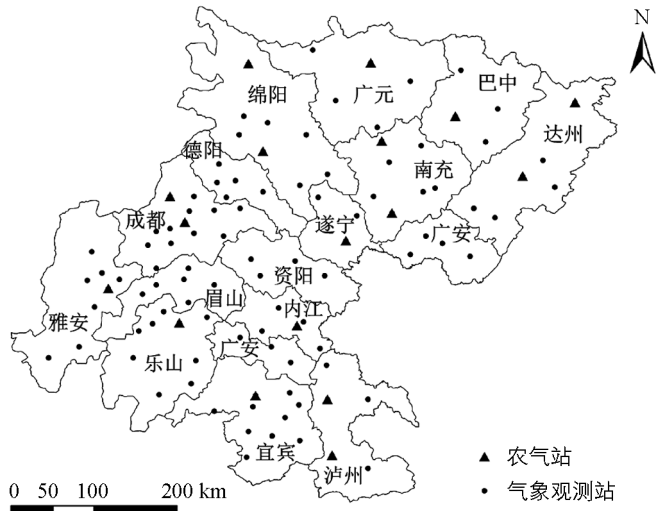


图 1 农气观测站和气象站的分布

1.2 数据来源

气象数据来源于中国气象科学数据共享服务网, 主要包括四川盆地 104 个气象观测站 1961—2010 年的平均气温、最高和最低气温、风速、日照时数、相对湿度以及降水量的逐日观测资料; 1981—2010 年 17 个农气站冬小麦的生育期数据来自中国气象科学数据共享服务网.

1.3 研究方法

1.3.1 冬小麦生育期

本文将冬小麦全生育期分为 3 个时期, 即: 播种至拔节期、拔节至开花期、开花至成熟期. 根据农气站冬小麦生育期的观测资料, 假设作物品种不变, 计算各研究区域内 1981—2010 年播种期、拔节期、开花期和成熟期的平均值(表 1).

表 1 冬小麦各生育期的开始和结束日期

| 研究区域 | 农气观测站 | 播种至拔节期 | 拔节至开花期 | 开花至成熟期 |
|--------|----------------|--------------|-----------|-----------|
| 盆南区 | 泸州、宜宾、叙永 | 11月上旬-次年1月中旬 | 1月下旬-4月中旬 | 4月下旬-5月上旬 |
| 盆西区 | 乐山、绵阳、都江堰、成都 | 11月上旬-次年2月上旬 | 2月中旬-4月下旬 | 5月上旬-5月中旬 |
| 盆中区 | 遂宁、阆中、南充、巴中、内江 | 11月上旬-次年2月上旬 | 2月中旬-4月下旬 | 5月上旬-5月中旬 |
| 盆周边缘山区 | 万源、平武、广元、雅安 | 10月下旬-次年2月上旬 | 2月中旬-4月下旬 | 5月上旬-5月中旬 |
| 盆东区 | 达州 | 10月下旬-次年2月上旬 | 2月中旬-4月下旬 | 5月上旬-5月中旬 |

1.3.2 冬小麦需水量

需水量利用作物系数修正参考作物蒸散量的方法求得^[17]:

$$ET_c = K_c \times ET_0 \quad (1)$$

式中: ET_c 是冬小麦的需水量(mm/d); K_c 是冬小麦系数; ET_0 是参考作物蒸散量(mm/d).

ET_0 采用 FAO 推荐的 Penman-Monteith 方法进行计算^[17]:

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

$$R_n = 0.77 \times R_s - 4.903 \times 10^{-9} \times (0.1 + 0.9 \times n/N)(0.34 - 0.14 \sqrt{e_a})(T_{\text{Max}}^4 + T_{\text{Min}}^4)/2 \quad (3)$$

$$e_s = \frac{e^0(T_{\text{max}}) + e^0(T_{\text{min}})}{2} \quad (4)$$

$$e_a = \frac{RH_{\text{mean}}}{100} \left[\frac{e^0(T_{\text{max}}) + e^0(T_{\text{min}})}{2} \right] \quad (5)$$

式中: R_n 是冬小麦表面的净辐射量(MJ/m^2); γ 是湿度计的常数($\text{kPa}/^\circ\text{C}$); T 是平均气温($^\circ\text{C}$); U_2 是 2 m 高处的风速(m/s); e_s 是空气的饱和水汽压(kPa); e_a 是空气的实际水汽压(kPa); Δ 是气温和饱和水汽压关系曲线斜率($\text{kPa}/^\circ\text{C}$); R_s 是地表短波辐射通量(MJ/m^2); n 是实际日照时间(h); N 是理论日照时间(h); T_{Max} 和 T_{Min} 分别是日最高气温和日最低气温(K); $e^0(T_{\text{max}})$ 和 $e^0(T_{\text{min}})$ 分别是出现日最高气温和最低气温时的饱和水汽压(kPa); RH_{mean} 是平均相对湿度($\%$).

K_c 的计算采用 FAO 的分段单值平均法^[18], 把冬小麦发育过程分为初始生长阶段(从播种直到覆盖率为 10%, 该时期的作物系数 K_{cni})、迅速发育阶段(从覆盖率达 10% 直到作物充分覆盖, 作物系数由 K_{cni} 升至 K_{cmid})、中期阶段(从完全覆盖直到开始成熟期, 作物系数 K_{cmid})、成熟阶段(从叶片泛黄直到收获, 作物系数由 K_{cmid} 降至 K_{cend}). FAO 提出的冬小麦在特定标准下的 K_{cni} , K_{cmid} 和 K_{cend} 值分别为 0.70, 1.16 和 0.40. 四川省大部分区域的情况不能满足特定标准条件, 因而本研究使用了王明田等^[19] 订正后的作物系数值.

1.3.3 水分盈亏状况

缺水量是指冬小麦各个生育期内需水量与降水量之差^[20]. 缺水量为正代表降水量未能满足冬小麦的用水需求, 缺水量为负代表降水量可以满足冬小麦的用水需求.

水分盈亏指数(I)是指某时段的降水量和冬小麦需水量之差与冬小麦需水量的比值^[21]:

$$I = \frac{(P - ET_c)}{ET_c} \quad (6)$$

式中: I 如果为正值代表水分盈余, I 如果为负值代表水分亏缺; P 是降水量(mm); ET_c 是冬小麦需水量(mm).

1.3.4 倾向率

倾向率表示气候因子的变化趋势, 以 b 的 10 倍来计算:

$$X_i = a + bt_i \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (7)$$

式中: X_i 是某一气候因子; t_i 是时间; n 是样本的数量; a 是常数; b 是一元回归系数.

2 结果及分析

2.1 各生育阶段降水量的时空分布特征

50 年间四川盆地冬小麦整个生育期年均降水量在(138~325) mm, 平均约 221 mm, 呈现西北低、其他地区高的分布特点(图 2a). 冬小麦整个生育期年降水量每 10 年的变化率为(-13.0~9.0) mm, 平均约 -0.5 mm; 盆地的东南、西南和北部地区整个生育阶段的降水呈下降趋势(图 3a), 区域内降水量减少的站点占全部站点的 47.1%, 但是均未通过显著性检验.

50 年间冬小麦播种至拔节期的年平均降水量在(27~114) mm, 平均约 62.1 mm, 呈现西北低而其余地区较高的特征(图 2b); 拔节至开花期年平均降水量在(29~88) mm, 平均约 57.8 mm, 呈现

西北低,东北、东南及西南较高的特征(图 2c);开花至成熟期年平均降水量在(76~154) mm,平均约 101 mm,呈现东北和南部高,中部和东南低的特征(图 2d).由此可知,开花至成熟期降水量最多,拔节至开花期最少.

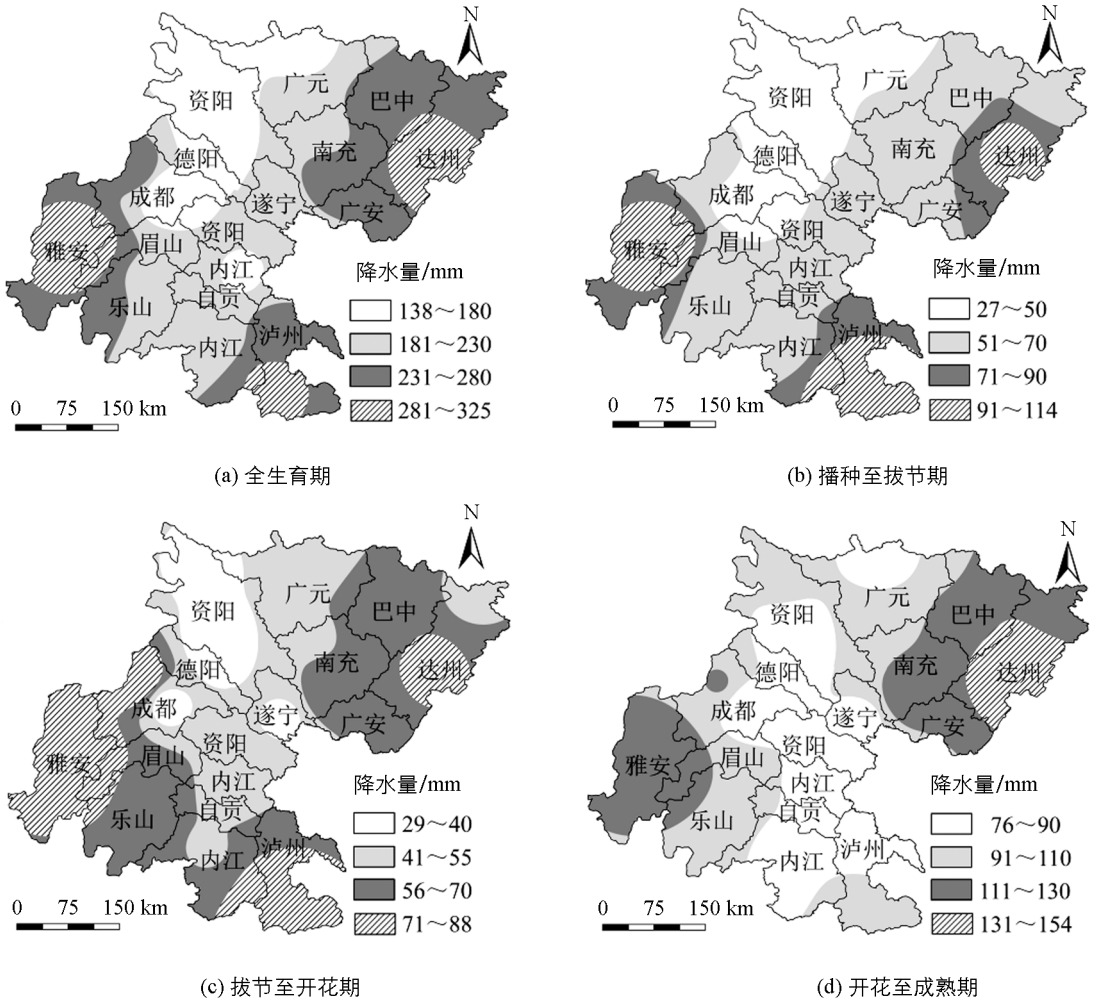


图 2 冬小麦各生育阶段降水量的分布特征(1961—2010 年)

50 年间冬小麦播种至拔节期降水量每 10 年的变化率在(-6.0~2.0) mm,平均约-1.3 mm,整体以减少趋势为主(图 3b),减少站点占总站数的 64.7%,但均未通过显著性检验;拔节至开花期冬小麦降水量每 10 年的变化率为(-2.0~4.0) mm,平均约 0.4 mm,减少的地区主要出现在东北、西南和南部地区(图 3c),降水量下降的站点占全部站点的 35.3%,但均未通过显著性检验;开花至成熟期降水量每 10 年的变化率在(-9.0~10.0) mm,平均约 0.7 mm,减少的站点在盆地北部和中部部分(图 3d),约占全部站点的 35.3%,但通过 $\alpha=0.05$ 显著性检验的站点只有 5.9%.由此可知,1961—2010 年来四川盆地冬小麦播种至拔节期的降水以下降趋势为主,拔节至成熟期的降水以增加趋势为主(图 3 数据是以每 10 年计).

2.2 各生育阶段需水量的时空分布特征

1961—2010 年来四川盆地冬小麦整个生育期年均需水量是(294~455) mm,平均约 369 mm,在盆地东北部、北部和西南地区较高,而在中部地区偏低(图 4a).50 年间冬小麦整个生育期年均需水量每 10 年的变化率是(-8.0~6.0) mm,平均约-2.4 mm,整个生育阶段年需水量以减少趋势为主(中部、西北部分地区除外)(图 5a),减少的站点占全部站点的 82.4%,通过 $\alpha=0.05$ 显著性检验的站点有 29.4%.

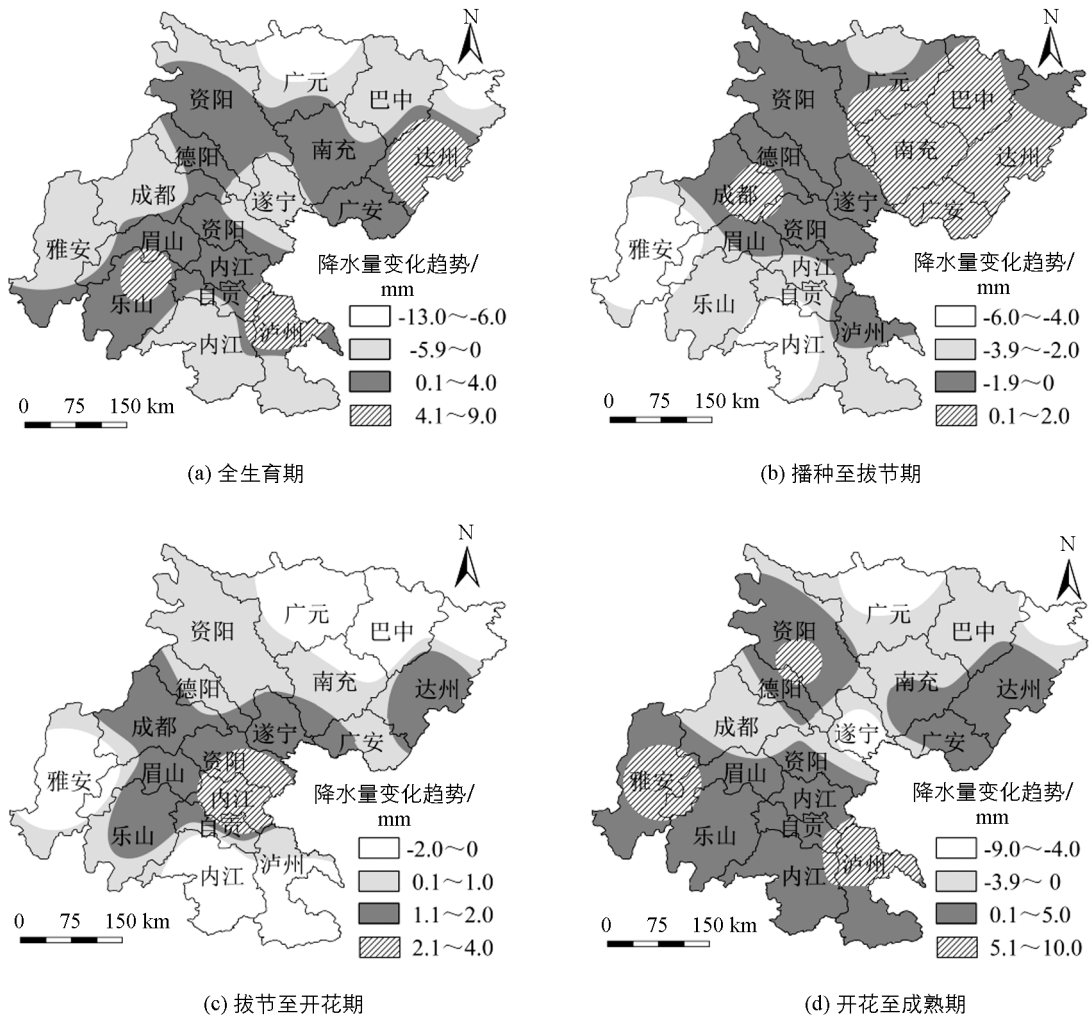


图 3 冬小麦各生育阶段降水量的变化趋势(1961—2010 年)

50 年间冬小麦播种至拔节期需水量是(113~202) mm, 平均约 145 mm, 呈现北部高、南部低的分布(图 4b); 拔节至开花期的需水量是(94~174) mm, 平均约 139 mm, 呈现西南向东北逐步递减而后又增加的趋势(图 4c); 开花至成熟期的需水量是(66~102) mm, 平均约 84 mm, 呈现北部和南部较高、中部较低分布(图 4d). 由此可知, 播种至拔节期需水量最大, 开花至成熟期最小; 各个生育期内(播种至拔节期除外)均呈现北部和南部较高、中部较低的空间特征, 这和整个生育期的分布相似.

50 年间冬小麦播种至拔节期需水量每 10 年的变化率是(-4.0~2.0) mm, 平均约 -1.5 mm, 呈现下降趋势(图 5b), 减少的站点占全部站点的 88.2%, 通过 $\alpha=0.05$ 显著性检验的站点有 52.9%; 拔节至开花期需水量每 10 年的变化率是(-3.0~2.0) mm, 平均约 -1.0 mm, 呈现下降趋势(图 5c), 减少的站点占全部站点的 82.4%, 但通过 $\alpha=0.05$ 显著性检验的站点只有 5.9%; 开花至成熟期需水量每 10 年的变化率是(-2.0~2.0) mm, 平均约为 0.1 mm(图 5d), 减少的站点占全部站点的 41.2%, 通过 $\alpha=0.05$ 显著性检验的站点有 23.5%. 综上所述, 50 年间盆地内冬小麦需水量在播种至开花期以下降趋势为主, 而在开花至成熟期的变化有增有减(图 5 数据是以每 10 年计).

2.3 各生育阶段缺水量的时空分布特征

1961—2010 年来四川盆地冬小麦整个生育期年均缺水量是(47~263) mm, 平均约 147 mm, 在盆地北部和中部高、南部和东北部低(图 6a). 50 年间冬小麦整个生育期缺水量每 10 年的变化率是(-13.0~11.0) mm, 平均约 -2.1 mm, 以下降趋势为主(图 7a), 下降的站点占全部站点的 58.8%, 但均未通过显著性检验.

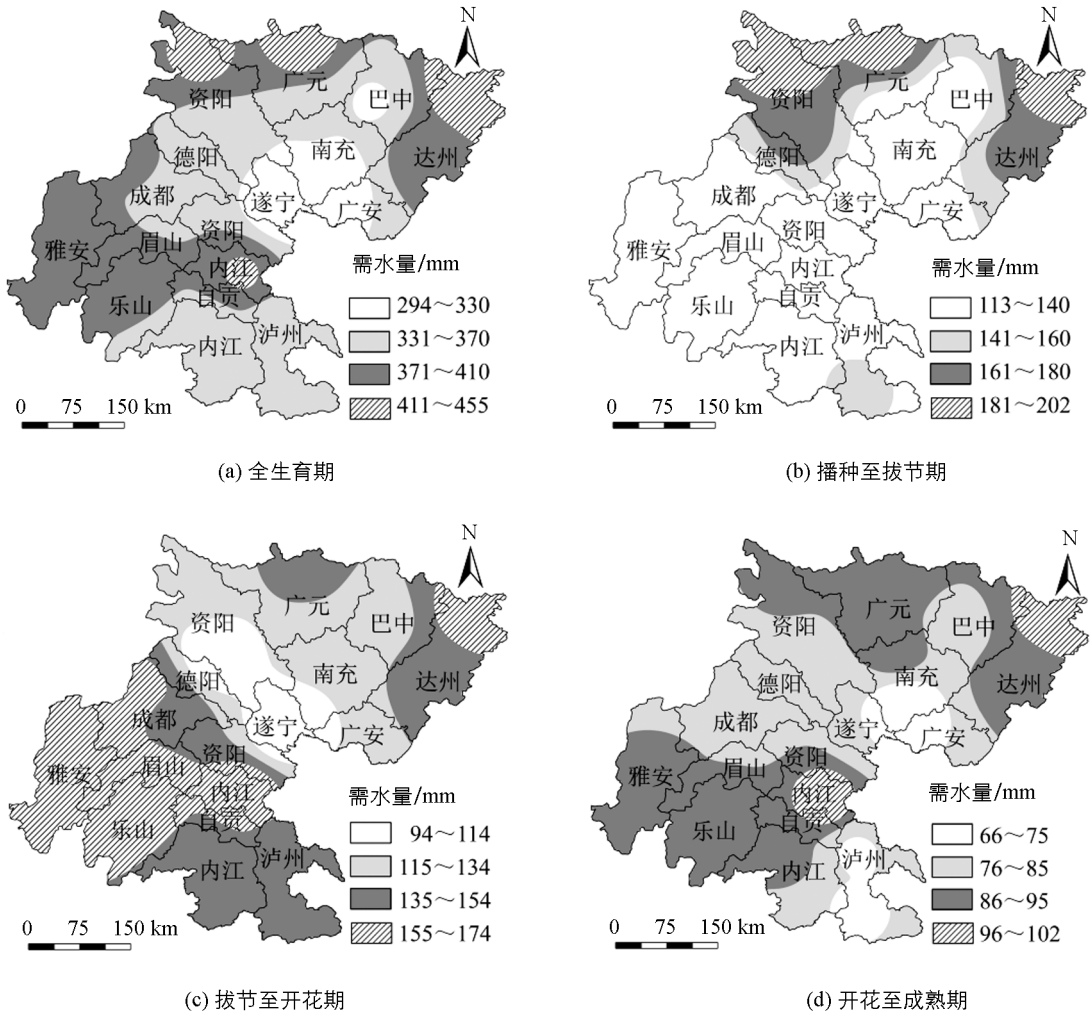


图 4 冬小麦各生育阶段需水量的分布特征(1961—2010 年)

50 年间冬小麦播种至拔节期缺水是(28~172) mm, 平均约 83 mm, 呈现北高南低的分布(图 6b); 拔节至开花期的缺水是(53~134) mm, 平均约 82 mm, 呈现北低南高的分布(图 6c); 开花至成熟期的缺水是(-66~19) mm, 平均约 -17 mm, 盆地内的水分条件总体较好, 仅在内江等个别地区出现缺水情况(图 6d). 播种至拔节期缺水最大, 拔节至开花期次之, 而开花至成熟期的降水量能满足冬小麦需水要求.

50 年间冬小麦播种至拔节期缺水量每 10 年的变化率是(-5.0~4.0) mm, 平均约 -0.3 mm(图 7b), 呈现下降的站点占全部站点的 58.8%, 但只有 5.9% 站点通过显著性检验; 拔节至开花期缺水量每 10 年的变化率是(-6.0~2.0) mm, 平均约 -1.4 mm(图 7c), 盆地缺水呈现下降趋势的站点占全部站点的 58.8%, 但是所有站点都未通过显著性检验; 开花至成熟期缺水量每 10 年的变化率是(-12.0~9.0) mm, 平均约 -0.6 mm(图 7d), 下降的站点占全部站点的 58.8%, 但通过 $\alpha = 0.05$ 显著性检验的站点只有 11.8%. 综上所述, 50 年间盆地内冬小麦各生育阶段的缺水量均以下降趋势为主, 拔节至开花期的减少速率最快(图 7 数据以每 10 年计).

2.4 代表站点冬小麦各生育阶段的水分状况

本研究选择了 5 个代表站点, 进一步分析各研究区域内冬小麦不同生育期的水分满足程度, 即: 盆南的叙永、盆西的都江堰、盆中的遂宁、盆周边的广元以及盆东的达州. 可以看出, 整个生育阶段内, 缺水状况最严重的是广元, 其次是都江堰、遂宁和达州, 最轻的是叙永, 缺水量分别是 264, 117,

114, 74, 70 mm, 水分盈亏指数是 -0.61, -0.39, -0.30, -0.19 和 -0.19, 所有区域的冬小麦均缺水(表 2)。

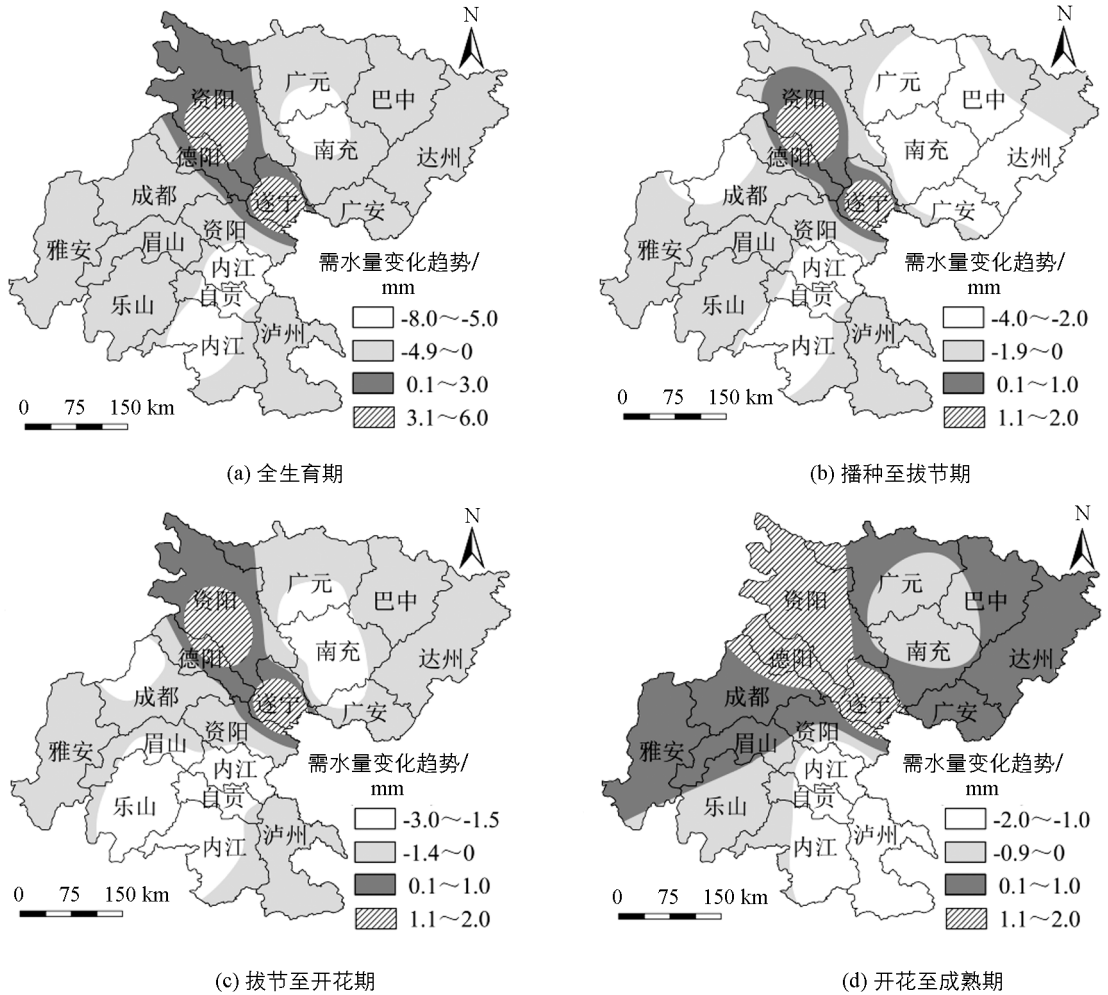


图 5 冬小麦各生育阶段需水量的变化趋势(1961—2010 年)

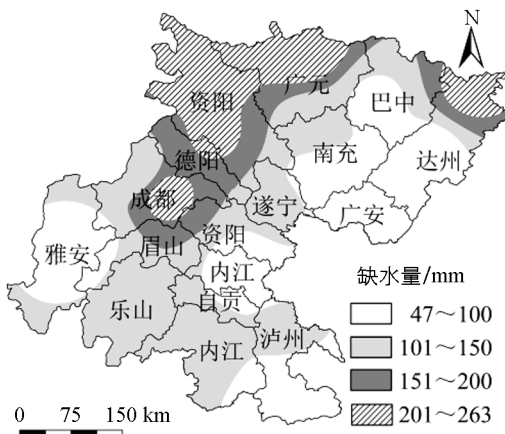
分析冬小麦各生育期的水分状况, 缺水最严重的阶段出现在拔节至开花期, 代表站点的缺水量分别是 60, 74, 56, 98 和 74 mm, 水分盈亏指数是 -0.41, -0.46, -0.60, -0.67 和 -0.50; 播种至拔节期次之, 代表站点缺水量分别是 28, 76, 72, 155 和 66 mm, 水分盈亏指数是 -0.20, -0.55, -0.57, -0.82 和 -0.40; 而开花至成熟期降水量基本能满足冬小麦生长需求(表 2)。

表 2 代表站点冬小麦各生育期的水分状况

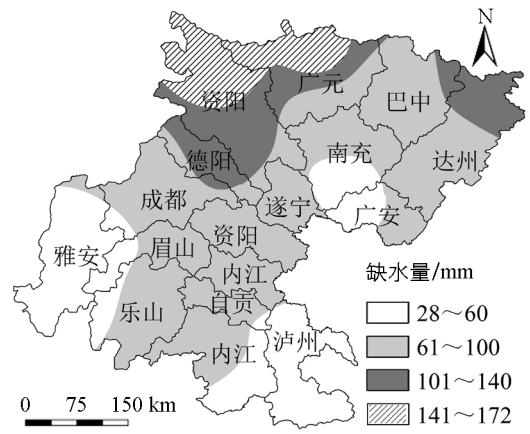
| 代表站点 | 要素 | 播种至拔节期 | 拔节至开花期 | 开花至成熟期 | 整个生育期 |
|---------|--------|--------|--------|--------|-------|
| 叙永(盆南) | 降水量 | 114 | 87 | 93 | 293 |
| | 需水量 | 142 | 147 | 74 | 363 |
| | 缺水量 | 28 | 60 | -19 | 70 |
| | 水分盈亏指数 | -0.20 | -0.41 | 0.26 | -0.19 |
| 都江堰(盆西) | 降水量 | 62 | 88 | 111 | 261 |
| | 需水量 | 138 | 162 | 75 | 375 |
| | 缺水量 | 76 | 74 | -36 | 114 |
| | 水分盈亏指数 | -0.55 | -0.46 | 0.48 | -0.30 |

续表 2

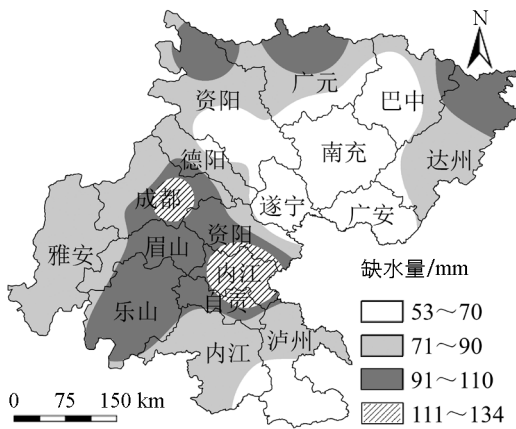
| 代表站点 | 要素 | 播种至拔节期 | 拔节至开花期 | 开花至成熟期 | 整个生育期 |
|---------|--------|--------|--------|--------|-------|
| 遂宁(盆中) | 降水量 | 56 | 38 | 86 | 180 |
| | 需水量 | 129 | 94 | 75 | 297 |
| | 缺水量 | 72 | 56 | -11 | 117 |
| | 水分盈亏指数 | -0.57 | -0.60 | 0.15 | -0.39 |
| 广元(盆周边) | 降水量 | 35 | 47 | 84 | 166 |
| | 需水量 | 190 | 144 | 95 | 429 |
| | 缺水量 | 155 | 98 | 11 | 264 |
| | 水分盈亏指数 | -0.82 | -0.67 | -0.12 | -0.61 |
| 达州(盆东) | 降水量 | 97 | 74 | 154 | 325 |
| | 需水量 | 163 | 148 | 89 | 399 |
| | 缺水量 | 66 | 74 | -66 | 74 |
| | 水分盈亏指数 | -0.40 | -0.50 | 0.73 | -0.19 |



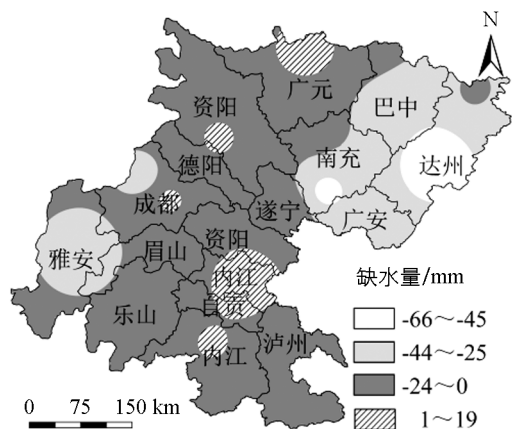
(a) 全生育期



(b) 播种至拔节期



(c) 拔节至开花期



(d) 开花至成熟期

图 6 冬小麦各生育阶段缺水量的分布特征(1961—2010年)

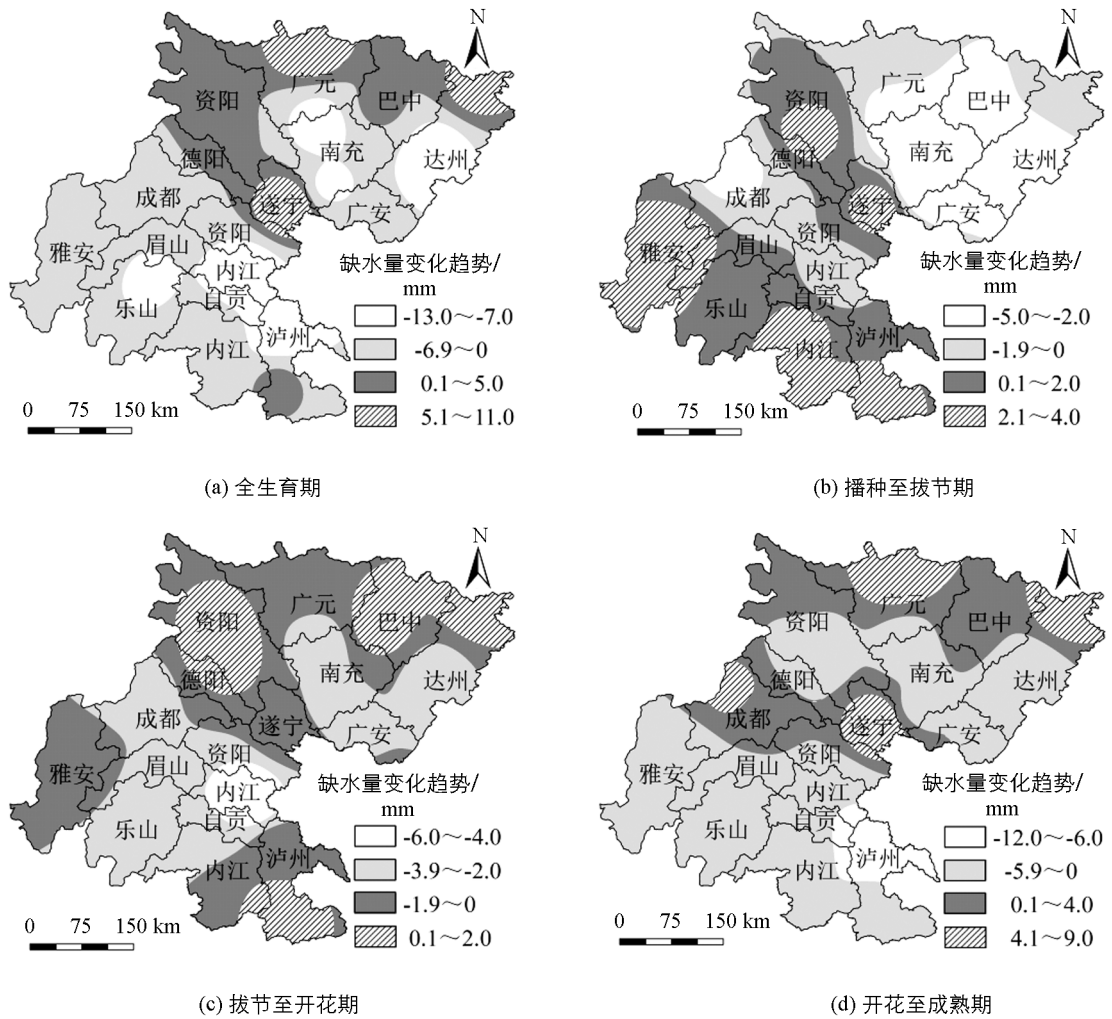


图 7 冬小麦各生育阶段缺水量的变化趋势(1961—2010 年)

3 结论和讨论

1) 1961—2010 年, 四川盆地冬小麦各生育阶段(开花至成熟期除外)降水量呈现西北低、其他地区高的特点. 50 年间冬小麦整个生育期年降水量有增有减, 每 10 年变化率为(-13.0~9.0) mm; 降水量在播种至拔节期以下降趋势为主, 但在拔节至成熟期以增加趋势为主.

2) 50 年间冬小麦各生育阶段(播种至拔节期除外)需水量呈现北部和南部较高、中部较低的特点. 50 年间整个生育期年需水量呈现下降趋势, 每 10 年变化率为(-8.0~6.0) mm; 需水量在播种至开花期以下降趋势为主, 但在开花至成熟期以升高趋势为主.

3) 50 年间冬小麦整个生育期缺水量在盆地北部、中部地区较高, 而在西南、东北部较低; 播种至拔节期呈现北高南低的特点, 拔节至开花期呈现北低南高的特点, 但开花至成熟期仅在在内江等个别地区出现缺水情况. 50 年间冬小麦整个生育期缺水量呈现下降趋势, 每 10 年变化率为(-13.0~11.0) mm; 缺水量在各生育期均以下降趋势为主.

4) 四川盆地各区域内的冬小麦整个生育期的水分均不能满足生长需要, 缺水状况最严重的是广元(盆周边), 最轻的是叙永(盆南). 冬小麦在拔节至开花期的缺水状况最严重, 播种至拔节期次之, 开花至成熟期的水分基本能满足需求.

5) 本研究提出, 区域内冬小麦播种至开花期处于缺水状况, 而开花至成熟期的降水基本能满足冬小麦

生长的需求. 前人的研究得出, 小麦拔节期、抽穗开花期为水分敏感期^[22-23], 因而, 如果该时期小麦的水分需求能得到满足, 将有利于小麦的稳产和增产. 其次, 本研究还提出盆周边冬小麦的缺水最严重, 因此, 这一区域应该加强农田基础设施建设, 统筹水资源的管理, 提高水利设施的调节与保证功能, 以减少干旱灾害带来的损失. 同时, 改善农田配套工程设施, 减少地表径流, 提高保水、保土和保肥能力, 是麦区需要解决的问题.

6) 本文是在假设冬小麦品种不变, 生育期采用了多年平均生育期数据得出的结论. 然而, 气温升高会缩短冬小麦的生育期, 影响产量形成. 另外, 气温升高也会提高病虫害的发生率, 使产量下降. 但是, 生产过程中, 为了提高气候资源利用效率, 可以采用调整播期、引进抗病虫害的小麦品种以及调节品种熟性等措施^[24].

参考文献:

- [1] 许武成, 周旭, 徐邓耀. 近 50 年川中丘陵区气候变化及与 ENSO 关系研究 [J]. 高原山地气象研究, 2008, 28(1): 52-56.
- [2] 陈超, 庞艳梅, 张玉芳. 近 50 年来四川盆地气候变化特征研究 [J]. 西南大学学报(自然科学版), 2010, 32(9): 115-120.
- [3] 徐晓, 肖天贵, 麻素红. 西南地区气候季节划分及特征分析 [J]. 高原山地气象研究, 2010, 30(1): 35-40.
- [4] 赵文虎, 孙卫国, 程炳岩. 近 50 年川渝地区的气温变化及其原因分析 [J]. 高原山地气象研究, 2008, 28(3): 59-67.
- [5] 赵静, 陈超, 周斌. 1960-2010 年四川最高、最低气温的非对称性变化特征 [J]. 高原山地气象研究, 2012, 32(3): 42-45.
- [6] WATSON R T, ZINYOWERA M C, MOSS R H, et al. Climate Change 1995: Impacts, Adaptation and Mitigation of Climate Change [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1996.
- [7] SUPIT I, DIEPEN C A, BOOGAARD H L, et al. Trend Analysis of the Water Requirements, Consumption and Deficit of Field Crops in Europe [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2010, 150(1): 77-88.
- [8] DOLL P. Impact of Climate Change and Variability on Irrigation Requirements a Global Perspective [J]. Climatic Change, 2002, 54(3): 269-293.
- [9] 刘晓英, 林而达. 气候变化对华北地区主要作物需水量的影响 [J]. 水利学报, 2004, 35(2): 77-82, 87.
- [10] 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.
- [11] 曹红霞, 粟晓玲, 康绍忠, 等. 关中地区气候变化对主要作物需水量影响的研究 [J]. 灌溉排水学报, 2008, 27(4): 6-9.
- [12] 杨晓琳, 宋振伟, 王宏, 等. 黄淮海农作区冬小麦需水量时空变化特征及气候影响因素分析 [J]. 中国生态农业学报, 2012, 20(3): 356-362.
- [13] 刘钰, 汪林, 倪广恒, 等. 中国主要作物灌溉需水量空间分布特征 [J]. 农业工程学报, 2009, 25(12): 6-12.
- [14] 孙爽, 杨晓光, 李克南, 等. 中国冬小麦需水量时空特征分析 [J]. 农业工程学报, 2013, 29(15): 72-82.
- [15] 张顺谦, 邓彪, 杨云洁. 四川旱地作物水分盈亏变化及其与气候变化的关系 [J]. 农业工程学报, 2012, 28(10): 105-111.
- [16] 王晓东, 马晓群, 许莹, 等. 淮河流域主要农作物全生育期水分盈亏时空变化分析 [J]. 资源科学, 2013, 35(3): 665-672.
- [17] ALLEN R G, PEREIRA L S, RAES D, et al. Crop Evapotranspiration Guidelines for Computing Crop Water Requirements-FAO Irrigation and Drainage Paper 56 [M]. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 1998.
- [18] 刘钰, PEREIRA L S. 对 FAO 推荐的作物系数计算方法的验证 [J]. 农业工程学报, 2000, 16(5): 26-30.

- [19] 王明田, 曲辉辉, 杨晓光, 等. 基于降水保证指数的四川省种植制度优化研究 [J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2012, 40(10): 82—92.
- [20] 闵瑾如, 贺菊美, 梁红, 等. 北方旱区主要农作物水分供需状况分析 [J]. 干旱地区农业研究, 1987, 5(1): 30—42.
- [21] 李世奎. 中国农业灾害风险评价与对策 [M]. 北京: 气象出版社, 1999.
- [22] 蔡焕杰, 康绍忠, 张振华, 等. 作物调亏灌溉的适宜时间与调亏程度的研究 [J]. 农业工程学报, 2000, 16(3): 47—54.
- [23] 胡志桥, 田霄鸿, 张久东, 等. 石羊河流域主要作物的需水量及需水规律的研究 [J]. 干旱地区农业研究, 2011, 29(3): 1—6.
- [24] 孙智辉, 王春乙. 气候变化对中国农业的影响 [J]. 科技导报, 2010, 28(4): 110—117.

Temporal-Spatial Variation of Water Requirement for Winter Wheat in Sichuan Basin During 1961—2010

PANG Yan-mei¹, CHEN Chao^{2,3}, PAN Xue-biao⁴

1. Institute of Plateau Meteorology, China Meteorological Administration/Heavy Rain and

Drought-Flood Disasters in Plateau and Basin Key Laboratory of Sichuan Province, Chengdu 610072, China;

2. Sichuan Provincial climate Centre, Chengdu 610072, China;

3. Provincial Key Laboratory of Water-Saving Agriculture in Hill Areas of Southern China, Chengdu 610066, China;

4. College of Resources and Environment, China Agricultural University, Beijing 100193, China

Abstract: The observation data from 104 meteorological stations over the period of 1961—2010 and the winter wheat data from 17 agrometeorological stations over the period of 1981—2010 in Sichuan Basin were used to estimate the water requirement of winter wheat in each of its growth stages and provide a guidance for agricultural water consumption in Sichuan Basin and to analyze the water budget condition during the winter wheat-growing season with the crop coefficient approach and the Penman-Monteith equation. The results revealed that the precipitation throughout the growing period of winter wheat (from sowing to maturity) increased in some areas but decreased in other areas from 1961 to 2010. The water requirement and water deficit from sowing to maturity decreased in the main. The water requirement decreased from sowing to flowering stage, but increased or decreased from flowering to maturity stage. The water deficit in each growth stage declined from 1961 to 2010. The precipitation during the period of winter wheat growth, from sowing to maturity, could not meet the water requirement of the crop in all the 5 regions studied, especially from jointing to flowering stages of the plants. A comparison of the water budget conditions of the representative stations of various regions showed that the most serious water deficit happened in the peripheral mountainous regions of Sichuan Basin.

Key words: climate change; winter wheat; water requirement; temporal-spatial variation

