

气候变化对南京主要作物需水量的影响

郝树荣¹, 俞方易¹, 张展羽¹, 金玉洁², 花剑岚²

(1. 河海大学水利水电学院, 江苏 南京 210098;

2. 南京市水利规划设计院有限责任公司, 江苏 南京 210006)

摘要:采用 Mann-Kendall 方法计算南京 1951—2005 年的作物需水量, 结合气象因素的变化趋势, 分析气候变化对南京主要作物需水量的影响, 提出应对气候变化的措施。结果表明: 夏作水稻、棉花和玉米的需水量减少, 主要与夏季增温不明显以及降雨增加、日照时数减少和风速显著降低有关; 冬小麦和油菜需水量呈增加趋势, 主要因为冬春季增温趋势率最大, 日照时数减少和风速的下降不足以抵消气温升高和湿度降低的影响。认为温度变化会改变作物种植制度, 可能带来作物总需水量的增加, 因此实施节水灌溉非常必要, 尤其是推行水稻蓄水控灌, 可减少灌排定额, 减小温室效应, 降低气候变化对水稻生产的影响。

关键词:气候变化; 作物需水量; 节水灌溉; 水稻生产; 南京

中图分类号: S271

文献标志码: A

文章编号: 1006-7647(2015)03-0025-05

Impact of climate change on water requirement of main crops in Nanjing//HAO Shurong¹, YU Fangyi¹, ZHANG Zhanyu¹, JIN Yujie², HUA Jianlan²(1. College of Water Conservancy and Hydropower, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. Nanjing Water Planning and Designing Institute Company Limited, Nanjing 210006, China)

Abstract: By Combining the variation of meteorological factors, it is analyzed the impact of climate change on water requirement of main crops in Nanjing, China and it is presented some measures to address the impacts of climate change. For achieving this goal, water requirement of crops in Nanjing from 1951 to 2005 is calculated with the method of Mann-Kendall. Combining the variation of meteorological factors, the paper analyzes the impact of climate change on water requirement of main crops in Nanjing and put forward some measures to address climate change. The data show that the decrease of water requirement of summer crops, such as rice, cotton and corn, is related with the insignificant increase of summer temperature, increase of rainfall, drop of sunshine hours, and slowdown of wind speed. While the increase of water requirement of winter wheat and canola is mainly related to the highest growth rate of winter and spring temperatures, the effect of drop in sunshine hours and slowdown in wind speed is not enough to offset that of the increase in temperature and the reduction in humidity. The cropping system is affected by temperature, which may bring the increase of total crop water requirement. Thus, water-saving irrigation, especially water impoundment for controlling irrigation is necessary to reduce irrigation and drainage quota, weaken greenhouse effect and reduce the impact of climate change on the rice production.

Key words: climate change; water requirement of crops; water-saving irrigation; rice production; Nanjing

近年来气候变化明显已成为不争的事实, 且随着人类活动的影响, 气候变化加剧的趋势还在继续^[1]。气候变化对作物生产的影响早有发现, 刘桃菊等^[2]通过模型模拟分析了气候变化与水稻生长发育及产量的关系; 孙莹等^[3]利用东港市 26 年来的观测资料, 分析了气象因素与产量的关系; 国际水稻研究所研究显示, 夜间最低温度对水稻产量影响最大, 水稻生长期平均夜间最低温度每增高 1℃, 产量下降 10%^[4]。罗玉峰等^[5]分析了高邮灌区水稻参考作物需水量 ET_0 的变化趋势, 认为 ET_0 随气温

上升和相对湿度下降而呈极显著的上升趋势。王新华等^[6]对张掖地区主要作物需水量的研究发现, 作物需水量与升温幅度呈线性正比例关系, 未来气温每升高 1℃, 作物需水量增加 4.0%~4.5%。罗玉峰等^[7]分析了柳园口灌区 ET_0 的长期变化趋势, 认为导致 ET_0 下降的主要原因是日照时数减少和风速的下降。从以上研究可以看出, 我国较早开展了气候变化对作物生产的影响, 但多侧重于气候变化对水稻产量的影响, 对策也主要从病虫害防治、品种选育、增加灌溉供水等方面提出。而作物生长受气候

变化影响的同时,必然会导致作物耗水过程的变化。目前气候变化对作物需水量的影响及成因分析研究较少,以灌溉为手段的对策研究还未见报道。本文以江苏南京为研究区域,探讨了气候变化对主要作物需水量的影响及应对灌溉措施,对于减小气候变化对农业用水和作物生产的不利影响、保障粮食安全和水资源可持续利用具有重要的意义。

1 南京气候变化特点

1.1 气候和需水量变化趋势检验方法

本文应用简单线性回归方法分析气候变化和作物需水量等相关变量的变化趋势,同时应用 Mann-Kendall (MK) 方法判别这种变化趋势是否具有统计学上的显著性。MK 方法由 Mann 在 1945 年首先提出, Kendall 在 1975 年加以改进, 该方法的优点在于不需要检验数据服从某种分布, 也不受少数异常值的干扰, 因此受到世界气象组织的高度推荐, 被普遍应用于水文气象参数变化趋势的显著性检验。如果 MK 方法检验得到的统计量 Z 是正值, 表明被检验序列呈增加的变化趋势, Z 为负表示呈减少的变化趋势, 如果 Z 的绝对值大于 95% 置信水平统计值 1.96, 表明序列呈现的变化趋势是显著的^[8]。

1.2 增温趋势明显

南京从 1905 年开始有气象观测数据, 见图 1, 1905—2005 年以来, 南京气温变化呈正弦波动, 有明显的增暖趋势, MK 方法检验的统计量 $Z=6.00$ 。

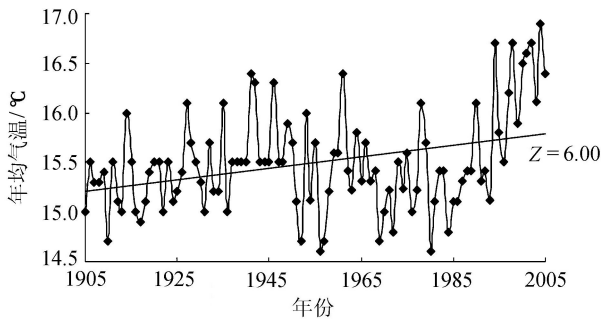


图 1 南京年平均气温变化

表 1 是不同时段南京四季平均温度及其变化, 冬季和春季增温率大于夏季、秋季和全年增温率, 春

表 1 南京温度变化特征

| 季节 | 平均温度/°C | | | | | | 趋势率/ (°C · a ⁻¹) | |
|----|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|---------------------------------|--------|
| | 1951—1960 年 | 1961—1970 年 | 1971—1980 年 | 1981—1990 年 | 1991—2000 年 | 2000—2005 年 | | |
| 全年 | 15.247 | 15.420 | 15.289 | 15.316 | 15.921 | 16.582 | 15.543 | 0.0267 |
| 春 | 15.683 | 16.078 | 16.227 | 16.346 | 16.960 | 17.727 | 16.392 | 0.0409 |
| 夏 | 25.903 | 26.308 | 25.972 | 25.746 | 26.182 | 26.807 | 26.093 | 0.0181 |
| 秋 | 16.069 | 16.123 | 15.927 | 16.089 | 16.373 | 17.241 | 16.218 | 0.0234 |
| 冬 | 4.637 | 4.353 | 4.517 | 4.615 | 5.601 | 6.015 | 4.860 | 0.0276 |

季增温率全年最大, 夏季平均气温的变化率不大。

1.3 降雨量呈增加趋势, 暴雨、洪涝屡破历史极值

对南京 55 年 (1951—2005 年) 的年降雨量进行统计, 见图 2, 发现多年平均降雨量有一定的增加趋势, 但增加趋势不显著 ($Z=1.23 < 1.96$)。1991 年汛期出现了百年未见的特大洪涝灾害, 汛期降雨量达 1021 mm, 年降雨量 1825 mm (常年降雨量平均值为 1025 mm)。2003 年又发生历史罕见的特大洪涝, 7 月 4 日 20 时至 5 日 20 时出现 207.2 mm 的特大暴雨, 突破百年历史极值 (1931 年 7 月 24 日降雨量 198.5 mm), 造成严重涝灾。

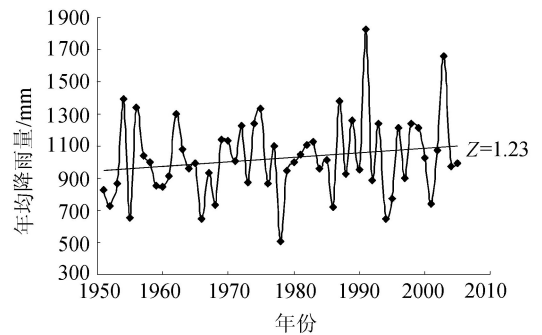


图 2 南京年均降雨量变化

1.4 日照时数、空气湿度和风速均呈降低趋势

对南京 55 年来的气象数据进行统计, 图 3~5 分别为南京年均日照时数、空气湿度和风速变化曲线, MK 方法检验的统计量 Z 分别为 -4.02、-2.83 和 -5.55, 可知均呈明显降低趋势。

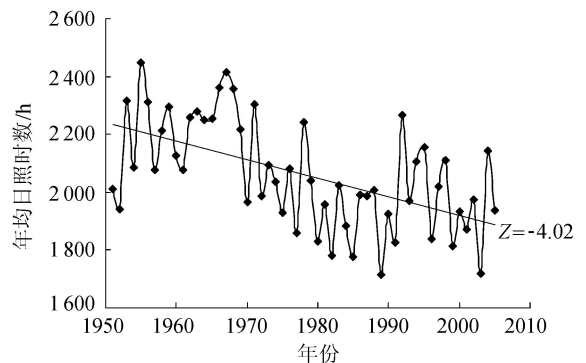


图 3 南京年均日照时数变化

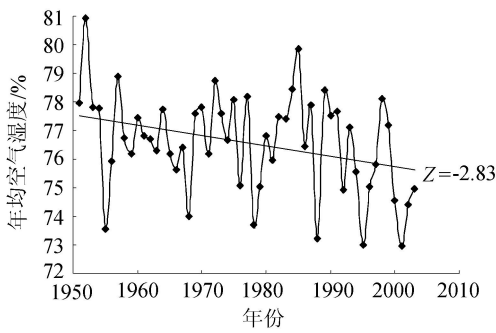


图4 南京年均空气湿度变化

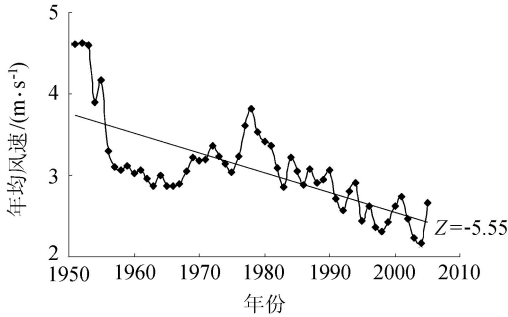


图5 南京年均风速变化

2 南京主要作物需水量的计算与分析

2.1 南京主要作物需水量的计算

2.1.1 参考作物需水量的确定

计算参考作物需水量的数据为南京市气象站1951—2005年逐日气象资料。逐日参考作物需水量计算采用广泛应用的Penman-Monteith公式^[9]：

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

式中： ET_0 为参考作物需水量，mm/d； Δ 为饱和水汽

压-温度关系曲线在平均气温处的切线斜率，kPa/°C； R_n 为输入冠层的净辐射，MJ/(m²·d)； G 为土壤热通量，MJ/(m²·d)； γ 为湿度计常数，kPa/°C； T 为平均气温，°C，按最高气温和最低气温的算术平均值计算； U_2 为2 m高度处的风速，m/s； e_a 为日平均饱和水汽压，kPa； e_d 为气象观测点实际水汽压，kPa。

2.1.2 作物系数的确定

联合国粮食及农业组织(FAO)将作物整个生长生育期划分为4个阶段，即初始生长期、生长发育期、生长中期和生长后期。用分段单值平均法计算作物各阶段的作物系数。选出南京主要作物在特定标准条件下(指空气湿度约为45%，风速约为2 m/s，供水充足，管理良好，生长正常，大面积高产的作物条件)相应阶段的作物系数，利用FAO推荐的经验修正公式^[8]和南京当地气候条件，对分段作物系数进行修正。考虑不同水文年气候条件对作物系数的影响，将南京1951—2005年降雨量排频适线，在 $P = 50\%$ 、 75% 和 95% 每个水文年型选取3个典型年，用3个典型年的气候数据对作物系数进行修改，得到不同水文年型作物系数的平均值，如表2所示。

2.1.3 作物需水量的计算

采用FAO推荐的单作物系数法计算作物需水量：

$$ET_c = \sum_{i=1}^n K_{ci} ET_{0i} \quad (2)$$

式中： ET_c 为实际作物整个生育期的需水量，mm； K_{ci} 为第*i*天对应生育阶段的作物系数； ET_{0i} 为第*i*天的参考作物需水量，mm； n 为作物生育期长度，d。

表2 南京主要作物生长期划分及对应阶段作物系数

| 作物 | 播种或移栽时间 | 生长生育期/d | 初始生长期/d | 生长发育期/d | 生长中期/d | 生长后期/d | 水文年型 | 作物系数 K_c | | |
|-----|---------|---------|---------|---------|--------|--------|------------|------------|------|------|
| | | | | | | | | 初始生长期 | 生长中期 | 生长后期 |
| 水稻 | 6月下旬 | 110 | 20 | 30 | 45 | 15 | $P = 50\%$ | 0.85 | 1.16 | 0.87 |
| | | | | | | | $P = 75\%$ | 0.90 | 1.17 | 0.87 |
| | | | | | | | $P = 95\%$ | 1.02 | 1.17 | 0.88 |
| 冬小麦 | 11月初 | 210 | 105 | 31 | 48 | 26 | $P = 50\%$ | 0.96 | 1.15 | 0.31 |
| | | | | | | | $P = 75\%$ | 1.05 | 1.15 | 0.32 |
| | | | | | | | $P = 95\%$ | 0.83 | 1.15 | 0.31 |
| 油菜 | 11月初 | 204 | 101 | 39 | 49 | 15 | $P = 50\%$ | 0.95 | 1.10 | 0.32 |
| | | | | | | | $P = 75\%$ | 0.82 | 1.10 | 0.35 |
| | | | | | | | $P = 95\%$ | 0.91 | 1.10 | 0.34 |
| 棉花 | 5月底6月初 | 152 | 18 | 30 | 58 | 50 | $P = 50\%$ | 0.70 | 1.11 | 0.58 |
| | | | | | | | $P = 75\%$ | 0.97 | 1.10 | 0.57 |
| | | | | | | | $P = 95\%$ | 0.99 | 1.13 | 0.59 |
| 玉米 | 6月中旬 | 96 | 15 | 25 | 36 | 20 | $P = 50\%$ | 1.09 | 1.14 | 0.32 |
| | | | | | | | $P = 75\%$ | 0.75 | 1.16 | 0.31 |
| | | | | | | | $P = 95\%$ | 0.72 | 1.19 | 0.34 |

注：未考虑不同水文年型作物生育期长度的变化。

用 Penman-Monteith 公式计算逐日 ET_0 , 整理得到各年参考作物需水量, 如图 6 所示, 根据单作物系数法计算逐日作物需水量, 整理得到各年作物全生育期需水量, 见图 7~11。

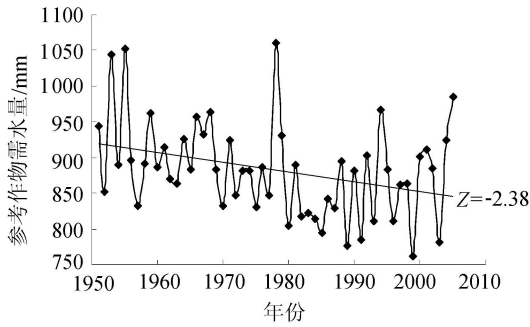


图 6 南京参考作物需水量变化

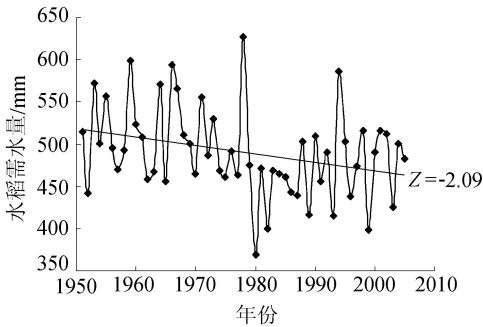


图 7 水稻需水量变化趋势

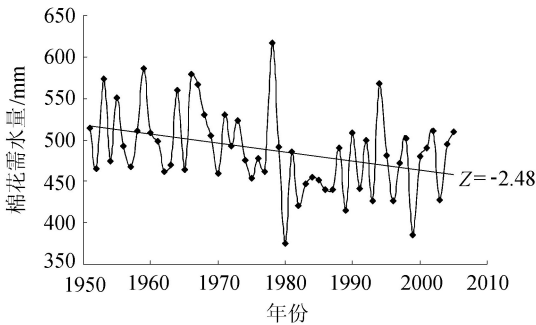


图 8 棉花需水量变化趋势

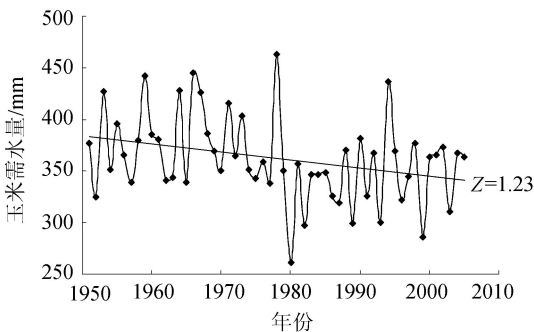


图 9 玉米需水量变化趋势

2.2 气候变化对作物需水量的影响

从图 6 可以看出, 南京参考作物需水量呈下降趋势 (Z 为 -2.38), 主要原因是降雨量的增加、日照时数的减少和风速的明显降低, 气温升高和湿度降

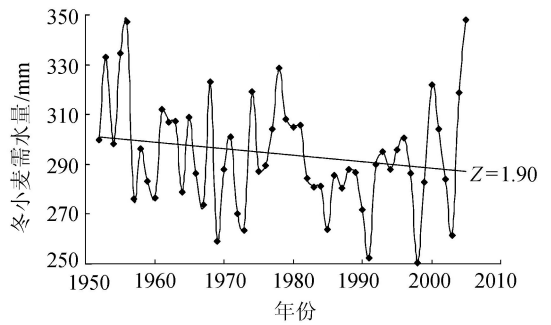


图 10 冬小麦需水量变化趋势

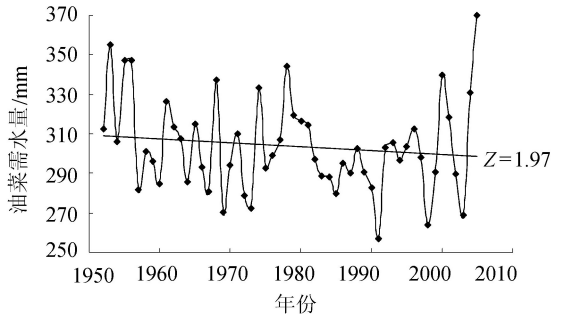


图 11 油菜需水量变化趋势

低并不足以抵消降雨量的增加、日照时数的减少和风速的下降。南京种植面积最大、需水量最多的作物是水稻, 从图 7~9 看出, 水稻、棉花和玉米需水量均呈逐年降低趋势 (Z 分别为 -2.09 、 -2.48 、 -2.05)。分析原因, 以上作物均为夏季耕作, 夏季增温趋势率在全年最低 (表 1), 且汛期降雨量增加, 日照时数减少和风速明显降低。图 10~11 表明, 冬小麦和油菜需水量均呈上升趋势 (Z 分别为 1.90 、 1.97), 其生育期主要经历增温趋势率最大的春、冬季, 日照时数的减少和风速的下降不足以抵消气温升高和湿度降低而使作物需水量上升。

3 应对气候变化的措施

a. 实施节水灌溉。虽然 1951—2005 年南京参考作物需水量呈下降趋势, 其中夏作水稻、棉花和玉米的需水量减少, 冬小麦和油菜需水量呈增加趋势, 但温度变化对作物种植制度有明显影响, 南京多年平均气温呈上升趋势, 在未来气候变暖的情况下, 南京种植模式会发生改变, 由以一年两熟稻麦轮作为为主向试种两年三熟和开展间作套种转变, 品种类型亦由早熟向晚熟转变, 由此可能会带来作物总需水量的增加。因此不能盲目乐观, 实施节水灌溉仍非常必要。

b. 推行水稻蓄水控灌。南京种植面积最大、需水量最多的作物是水稻。研究表明, 稻田淹水灌溉会增加二氧化碳、甲烷等温室气体的排放, 推行水稻节水灌溉, 可使温室气体排放量减小, 持续淹灌稻田甲烷排放量与产量呈显著负相关, 减排稻田甲烷与

增加产量的目标一致。因此气候变化使水稻节水灌溉尤为必要。南京降雨时空分布不均,汛期降雨占全年降雨量的65%,汛期中梅雨明显,常连降暴雨、大暴雨,随着全球气候变暖,极端天气发生频率增加,汛期暴雨发生概率更大,为提高雨水利用率,推荐水稻采用蓄水控灌措施^[10],它在降低土壤水分控制下限的同时,通过提高雨后蓄水上限或滞留时间,扩大稻田储水库容,充分利用天然降水,减少灌排次数、灌排定额和氮磷排放量。该技术在南京进行了5年试验和示范,能在不明显降低产量和品质的前提下,达到田间尺度上灌排次数减少1~2次、节水10%以上、氮磷负荷减少17%~32%的目标,具有较好的经济效益和环境效益。

4 结 语

气候变化对南京作物需水量会产生较大的影响。夏作作物水稻、棉花和玉米需水量均呈逐年降低趋势,由于夏季增温趋势率全年最低,故气温升高和湿度降低并不足以抵消降雨量的增加、日照时数减少和风速的下降而使作物需水量下降。冬小麦和油菜需水量呈上升趋势,其生育期主要经历增温趋势率最大的春、冬季,日照时数减少和风速的下降不足以抵消气温升高和湿度降低而使作物需水量上升。由此可见,温度变化对作物需水量影响最大。此结论与王新华等^[6]研究结论相似,即作物需水量与升温幅度呈线性相关;与罗玉峰等^[7]的研究结论有部分出入,他认为导致 ET_0 下降的主要原因是日照时数减少和风速的下降。因此,不同地区作物需水量的变化趋势及成因还有待于长系列资料的进一步分析验证。

参考文献:

[1] 宋晓猛,张建云,占车生,等. 气候变化和人类活动对水文循环影响研究进展[J]. 水利学报,2013,44(7):779-787. (SONG Xiaomeng, ZHANG Jianyun, ZHAN Chesheng, et al. Review for impacts of climate change and human activities on water cycle[J]. Journal of Hydraulic Engineering,2013,44(7):779-787. (in Chinese))

[2] 刘桃菊,殷新佑,戚昌瀚,等. 气候变化与水稻生长发育及产量形成关系的模拟研究[J]. 应用生态学报,2005,16(3):486-490. (LIU Taoju, YIN Xinyou, QI Changhan, et al. Relationships between climate change and rice development and its yield formation: a simulation study [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2005, 16(3):

486-490. (in Chinese))

[3] 孙莹,于文革,白广田,等. 东港气候变化特征及其对水稻生长的影响[J]. 辽宁农业科学,2006(6):8-10. (SUN Ying, YU Wenge, BAI Guangtian, et al. Effect of climate change on rice in Donggang City [J]. Liaoning Agricultural Sciences,2006(6):8-10. (in Chinese))

[4] PENG S B, HUANG J L, SLEEHEY J E, et al. Rice yields decline with higher night temperature from global warming [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2004, 101(27): 9971-9975.

[5] 罗玉峰,彭世彰,王卫光,等. 气候变化对水稻灌溉需水量的影响[J]. 武汉大学学报:工学版,2009,42(5):609-613. (LUO Yufeng, PENG Shizhang, WANG Weiguang, et al. Impacts of climate change on irrigation water requirements of rice: a case study of Gaoyou Irrigation District [J]. Engineering Journal of Wuhan University,2009,42(5):609-613. (in Chinese))

[6] 王新华,李应海,王建雄. 气候变化对张掖地区作物需水量的影响[J]. 人民黄河,2007,29(10):61-64. (WANG Xinhua, LI Yinghai, WANG Jianxiang. Impact of climate change on water requirement of crops in Zhangye [J]. Yellow River,2007,29(10):61-64. (in Chinese))

[7] 罗玉峰,缴锡云,彭世彰. 柳园口灌区参考作物腾发量的长期变化趋势及其对灌溉需水量的影响[J]. 农业工程科学,2008,24(9):480-484. (LUO Yufeng, JIAO Xiyun, PENG Shizhang. Long-term trend of reference evapotranspiration in Liyuankou irrigation system and its impacts on irrigation water requirements [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin,2008,24(9):480-484. (in Chinese))

[8] 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 Chinese Society of Agricultural Engineering, 2013, 29(14):90-98. (in Chinese))

[9] 彭世彰,徐俊增. 农业高效节水灌溉理论与模式[M]. 北京:科学出版社,2009:83-84.

[10] 郭相平,袁静,郭枫,等. 水稻蓄水-控灌技术初探[J]. 农业工程学报,2009,25(4):70-73. (GUO Xiangping, YUAN Jing, GUO Feng, et al. Preliminary study on water-catching and controlled irrigation technology of rice [J]. Transactions of the CSAE, 2009, 25(4):70-73. (in Chinese))

(收稿日期:2014-05-21 编辑:骆超)