

文章编号: 0559-9350 (2004) 02-0077-07

## 气候变化对华北地区主要作物需水量的影响

刘晓英, 林而达

(中国农业科学院 农业气象研究所, 北京 100081)

**摘要:** 在未来温度上升 1~4 的情景下, 研究了气候变暖对我国华北地区主要作物需水量的影响。结果显示, 气候变暖对不同作物需水量的影响程度不同。其中对冬小麦需水量的影响最大, 对棉花的影响次之, 对夏玉米的影响最小。当生长期温度上升 1~4 时, 冬小麦需水量将增加 2.6%~28.2%, 相当于 11.8~153.0mm; 夏玉米需水量将增加 1.7%~13.1%, 相当于 7.2~84.1mm; 棉花需水量将增加 1.7%~18.3%, 相当于 7.9~96.2mm。说明冬小麦对未来气候变暖的适应能力很差, 而夏玉米和棉花的适应能力相对较强。气候变化对作物需水量的影响存在一定地域性差异。其中对济南的作物需水量影响最大。当温度增加 1~4 时, 冬小麦、夏玉米、棉花需水量将依次增加 15.4~153.0mm、8.3~84.1mm、9.6~96.2mm。对太原的作物需水量影响最小。当温度上升 1~4 时, 3种作物的需水量依次增加 11.7~114.5mm、6.9~68.3mm、7.9~78.0mm, 比济南分别低 24%~25%、17%~19%和 18%~19%。按华北地区目前的种植结构估算, 温度上升 1~4 将使整个地区冬小麦的需水增加 14.7~191 亿 m<sup>3</sup>; 夏玉米的需水增加 5.87~68.6 亿 m<sup>3</sup>; 棉花的需水增加 1.35~16.5 亿 m<sup>3</sup>。未来气候变暖将使华北地区业已紧张的水资源供需矛盾将更加突出。

**关键词:** 气候变化; 温度; 作物需水量; 华北

**中图分类号:** S161

**文献标识码:** A

自 20 世纪 80 年代以来, 不断有研究结果表明全球年平均地表温度持续上升, 引起全球气候变暖。目前, 全球变暖已成为一个不争的事实。过去 100 年来, 全球平均温度已升高 0.6~0.7, 其中最暖的几年都发生在 20 世纪 90 年代。而且越来越多的事实证明, 人类活动排放的温室气体在全球变暖中起着重要作用<sup>[1]</sup>。人们对未来气候变化将造成的不良后果十分关心。许多国家都对此做了认真研究, 以便及时采取对策, 对农业做出相应调整。

华北地区指西南部以黄河为界, 北起滦河流域, 东临渤海与黄海, 包括京津两市、河北、山西两省和豫北、鲁北及胶东地区, 总面积 47.62 万 km<sup>2</sup>, 人口 1.63 亿, 耕地 0.163 亿 hm<sup>2</sup>, 有效灌溉面积 0.092 亿 hm<sup>2</sup>。华北地处东亚季风区, 是我国重要的粮棉主要产区之一。据最新资料统计<sup>[2]</sup>, 华北地区小麦、玉米、棉花播种面积分别占全国总播种的 56.7%、37.7%、37.5%, 相应产量分别占全国总产量的 46.9%、35.4%和 42.4%。无论从播种面积、还是产量来看, 均居全国首位。但华北地区水资源短缺, 干旱灾害频繁, 是世界上重要的气候脆弱区之一。近年来由于气候变暖变干, 尤其冬季变暖使冬旱面积几乎成倍增加。气候变暖有可能使我国 21 世纪面临更严重的水资源危机<sup>[3]</sup>。为此, 研究气候变化对本区主要作物需水量的影响, 将为尽早建立预报预警系统, 缓解水资源供需矛盾, 制定防灾减灾提供决策依据。

近几十年来, 尽管我国加强了气候变化的影响研究, 但主要集中在温度变化的分析上。未来气候变化对我国不同地区的农业需水将产生怎样影响, 目前缺乏系统与定量的数据支持。本文以干旱缺水的华北地区为研究对象, 采用不同的温度情景, 对这一问题进行探讨。

收稿日期: 2002-08-15

基金项目: 国家基础研究发展规划资助项目 (G1999043404)

作者简介: 刘晓英 (1964-), 女, 河北定兴人, 副研究员, 博士, 主要从事植物水分关系和节水方面的研究。

# 1 基本情况

在华北地区选取了 6 个有代表性的气象站点，其中包括北京、天津、石家庄、郑州、济南和太原，各站的基本情况见表 1。

表 1 各站基本情况

站点	纬度	经度	海拔/m	多年平均降雨/mm	多年平均干燥度	资料系列长度(年)
北京	39 48	116 28	31.3	616.4	3.35	50
天津	39 05	117 04	25.0	553.7	2.29	47
石家庄	38 02	114 25	81.0	539.2	2.28	46
郑州	34 43	113 09	110.4	637.5	1.94	46
济南	36 41	116 59	51.6	671.6	2.19	50
太原	37 47	112 33	778.3	445.4	2.64	50

华北地区热量充足，适宜多种粮食及经济作物生长，播种面积最大的 3 种作物为冬小麦、夏玉米和棉花。本文只研究气候变暖对这三大作物需水量的影响。

# 2 计算原理与方法

作物需水量是农田水分循环系统中最重要的因素之一，它是水利工程规划设计及节水农业研究中非常重要的参数。作物需水量可由实测土壤水分通过水量平衡法计算得到，也可由综合性的气候学方法计算得到。由于土壤水分的不易获得性及其空间变异性，综合性的气候学方法得到广泛应用。根据联合国粮农组织推荐的公式<sup>[4]</sup>，在土壤水分不成为限制因素的条件下，作物需水量计算公式为

$$ET_p = K_c \times ET_0 \tag{1}$$

式中： $ET_p$  为充分供水下作物需水量 ( $\text{mmd}^{-1}$ )； $K_c$  为作物系数，由充分供水试验得到，本文采用文献 [5] 推荐的结果，其中冬小麦、夏玉米和棉花的作物系数分别为 0.85、0.86 和 0.74； $ET_0$  为参照作物蒸散量 ( $\text{mmd}^{-1}$ )，具体计算过程见表 2。

表 2 用 Penman 法计算  $ET_0$  的过程、中间变量及其含义

名称	公式	单位
参照作物腾发量	$ET_0 = ET_{Rns} - ET_{Rbl} + ET_{aero}$	$\text{mmd}^{-1}$
净短波辐射项	$ET_{Rns} = \frac{R_n}{\rho_w} \times R_{ns}$	$\text{mmd}^{-1}$
黑体长波辐射项	$ET_{Rbl} = \frac{R_{bl}}{\rho_w} \times R_{bl}$	$\text{mmd}^{-1}$
空气动力学项	$ET_{aero} = \frac{e_a - e_d}{\rho_w} \times (a_1 + b_1 U_2)$ $a_1 = 0.26, b_1 = 0.14$	$\text{mmd}^{-1}$
饱和水汽压 $e_a$	$e_a = 6.108 \exp(17.27 T / (T + 237.3))$	mbar
实际水汽压 $e_d$	$e_d = e_a RH_{mean} / 100$	mbar
饱和水汽压 - 气温关系斜率	$= 4098 e_a / (T + 237.3)^2$	$\text{mbar}^0 \text{c}^{-1}$
干湿计常数	$= 1.61452 P / \rho_w$	$\text{mbar}^0 \text{c}^{-1}$
水的汽化潜热	$= 4.1855(595 - 0.51 T)$ 或 $= 2.45$	$\text{Jg}^{-1}$
高程 H 处的气压	$P = 1010 - 0.115 H + (0.00175 H)^2$	mbar
2m 高处的风速	$U_2 = (2/z)^{0.17} U_z$	$\text{ms}^{-1}$
冠层表面净辐射	$R_n = R_{ns} - R_{bl}$	$\text{mmd}^{-1}$
净短波辐射	$R_{ns} = (1 - \alpha_s) (a_2 + b_2 n/N) R_a$ , $\alpha_s = 0.23, a_2 = 0.21, b_2 = 0.56$	$\text{mmd}^{-1}$
黑体长波辐射	$R_{bl} = 1.9838 \times 10^{-9} (0.3 + 0.7 n/N) (0.32 - 0.026 \sqrt{e_d}) T_k^4$	$\text{mmd}^{-1}$
理论太阳总辐射	$R_a = 15.54 ( \sin \phi \sin \delta + \cos \phi \cos \delta \sin \omega_s ) / d_r^2$	$\text{mmd}^{-1}$
日 - 地相对距离	$d_r = 1 - 0.01673 \cos(2 J / 365)$	
太阳磁偏角	$= 0.4093 \sin(2 J / 365 - 1.405)$	rad
日落时角度	$\omega_s = \arccos(- \tan \phi \tan \delta)$	rad
理论日照时数	$N = 24 \omega_s / \pi + 0.1$	h

注：表中多数内容引自文献 [6]

由式 (1) 可见, 参照作物蒸散量  $ET_0$  是影响作物需水量的关键因子, 而在影响  $ET_0$  的诸多气象因素中, 温度是最为重要的因素 (见表 2)。因此, 气候变暖将通过温度的变化影响作物对水分的需求。

气候变化情景的获得, 除了可以通过运行大气环流模式 (GCM) 外, 简单的方法是使用一些假定的气候要素变化<sup>[1]</sup>, 例如温度升高 1 或降水量减少 10 % 等, 甚至可以在一定范围内进行不同温度、降水梯度的敏感性分析。本文将采用第 2 种简单的方法, 即假定温度变化情景。据预测, 未来由于温室效应增强而导致的变暖, 温度可能升高 1.5~4.5<sup>[7]</sup>。另据许吟龙根据英国 Hadley 模型的预测, 在温室排放气体年递增 1 % 的情景下, 到 2056 年我国华北地区各月平均气温将上升 1.7~3.79 (气象所网上公布结果)。故本文假定未来温度情景为上升 1~4。

根据各气象站历年逐月的平均气象数据, 在 3 种作物生长期内温度分别增加 1~4、而其它气象要素保持不变的情景下, 逐年计算 3 种作物的需水量, 最后取多年平均值作为气候变化的影响结果。

### 3 结果与讨论

**3.1 不同作物需水量对气候变化的响应差异** 图 1 为 3 种作物在生长期内温度分别增加 1~4 时, 需水量相应增加的百分数。图 1 中 6 个站点的结果一致表明, 随温度上升, 3 种作物的需水量随之增加。其中气候变暖对冬小麦需水量的影响最大, 对夏玉米和棉花需水量的影响相对较小。在给定温度情景下, 北京、天津、石家庄、郑州、济南、太原 6 个站点冬小麦的需水量将依次增加 2.8%~28.2%、2.8%~27.8%、2.6%~25.8%、2.7%~26.5%、2.6%~26.2%、2.6%~25.7%; 夏玉米需水量将依次增加 1.8%~18.0%、1.8%~18.1%、1.7%~17.5%、1.7%~17.6%、1.7%~17.4%、1.7%~16.6%; 棉花需水量依次增加 1.8%~18.1%、1.7%~17.6%、1.8%~18.3%、1.8%~17.7%、1.8%~17.5%、1.7%~16.8%。将所有站点的结果综合来看, 当温度上升 1~4 时, 华北地区冬小麦、夏玉米和棉花的需水量将分别增加 2.6%~28.2%、1.7%~18.1%、1.7%~18.3%。

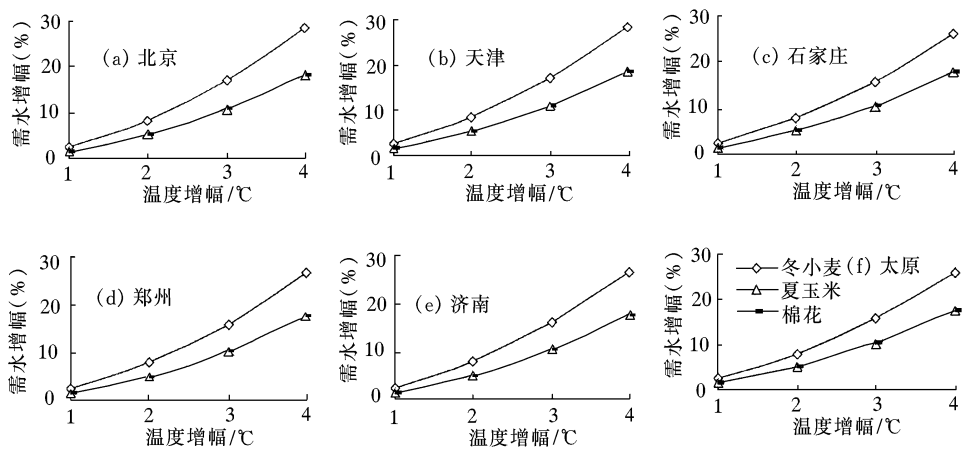


图 1 给定温度情景对作物需水量 (%) 的影响

由于冬小麦、夏玉米和棉花 3 种作物有各自的生长发育特点, 故其需水特性有很大差异。仅从需水量增加的百分数只能了解气候变暖影响的一个侧面。例如, 对于不同作物, 在需水增加百分数相同的情况下, 对应的绝对需水增加量会不同, 故有必要从绝对增加量上进一步分析气候变化的影响。图 2 是给定温度情景下 3 种作物需水量绝对数量的变化情况。

图 2 与图 1 的趋势完全相同, 但气候变暖对玉米和棉花需水量影响的差异在图 2 中表现得更为清晰和明显。图 2 显示, 气候变暖对冬小麦需水量的影响最大, 其次为棉花, 对夏玉米需水量的影响最小。当温度上升 1 时, 冬小麦、夏玉米、棉花需水量将增加 11.7~15mm、6.9~8.3mm、7.9~

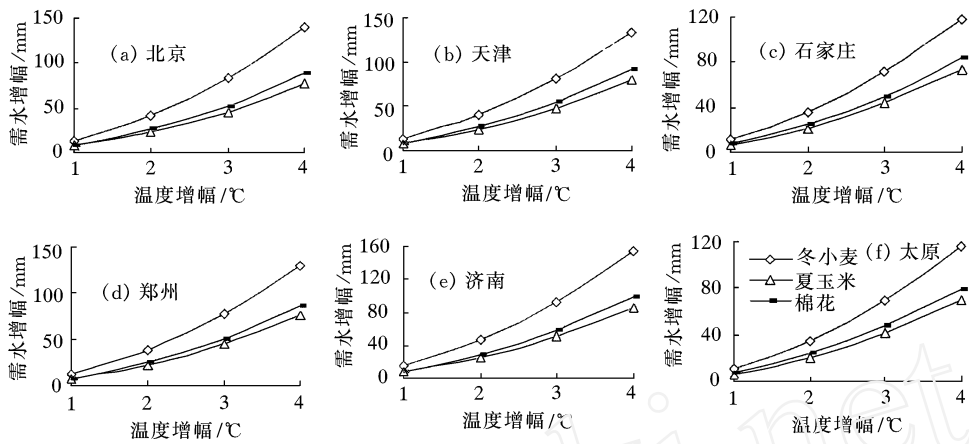


图2 给定温度情景对作物需水量(绝对值)的影响

9.6mm;当温度上升2℃时,3种作物的需水量依次增加35.0~46.3mm、20.5~24.9mm、23.6~28.8mm;当温度上升3℃时,3种作物的需水量依次增加69.5~92.2mm、40.9~50.0mm、47~57.5mm;当温度上升4℃时,3种作物的需水量依次增加114.5~153.0mm、68.3~84.1mm、78.0~96.2mm。

综合各站点的结果来看,当温度上升1~4℃时,华北地区冬小麦需水量将增加11.8~153.0mm;夏玉米需水量将增加7.2~84.1mm;棉花需水量将增加7.9~96.2mm。

**3.2 作物需水量对气候变化响应的区域差异** 根据图2,在给定温度情景下,北京冬小麦、夏玉米、棉花的需水量将分别增加14.0~139.4mm、7.6~76.5mm、8.8~87.7mm;天津相应3种作物的需水量将分别增加13.4~133.6mm、7.8~79.4mm、9.1~91.0mm;石家庄相应3种作物的需水量将分别增加11.8~117.2mm、7.2~73.0mm、8.2~82.7mm;郑州相应3种作物的需水量将分别增加12.9~128.9mm、7.4~75.7mm、8.4~85.0mm;济南相应3种作物的需水量将分别增加15.4~153.0mm、8.3~84.1mm、9.6~96.2mm;太原相应3种作物的需水量将分别增加11.7~114.5mm、6.9~68.3mm、7.9~78.0mm。可见,不同地区同一种作物对气候变化的响应存在差异。为分析方便,将同一作物不同地区的结果绘于图3。

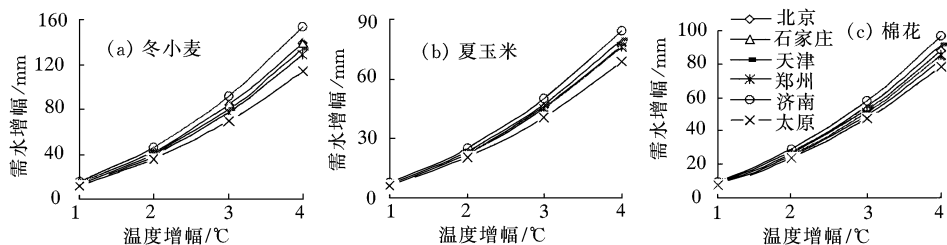


图3 不同地区作物需水量对气候变暖响应的差异

图3清楚地显示,不论冬小麦,夏玉米还是棉花,以气候变化对山东济南的作物需水量影响最大。当温度增加1℃时,冬小麦、夏玉米、棉花需水量将依次增加15.4、8.3、9.6mm;当温度增加2℃时,3种作物需水量依次增加46.3、24.9、28.8mm;当温度增加3℃时,3种作物需水量依次增加92.2、50.0、57.5mm;当温度增加4℃时,3种作物需水量依次增加153.0、84.1、96.2mm。以气候变化对山西太原的作物需水量影响最小。当温度增加1℃时,冬小麦、夏玉米,棉花需水量将依次增加11.7、6.9、7.9mm,比济南分别低3.7、1.4、1.7mm;当温度增加2℃时,3种作物需水量依次增加35.0、20.5、23.6mm,比济南分别低11.2、4.4、5.1mm;当温度增加3℃时,3种作物需水量依次增加69.5、40.9、47.0mm,比济南分别低22.7、9.1、10.5mm;当温度增加4℃时,3种作物需水量依

次增加 114.5、68.3、78.0mm，比济南分别低 38.5、15.8、18.2mm。

气候变化对作物需水量影响存在的这种地域性差异可能与海拔高度有关。由表 1 可知，济南的海拔高度为 51.6m，而太原的海拔高度为 778.3m。

3.3 气候变化对灌溉需水量的影响 近几十年来，由于地下水的不断超采，导致华北地区地下水位显著下降，使作物生长需要的水分来源发生变化。目前，华北地区作物生长所需水分主要来自天然降水和灌溉补充。因此，灌溉需水量可以认为是作物需水量与天然降水之差，即

$$IR = ET_p - P \quad (2)$$

式中： $IR$  为灌溉需水量 (mm)； $P$  为作物生长期内降雨量 (mm)。根据近 50 年的气象资料，各站冬小麦、夏玉米、棉花生长期内多年平均降雨量见表 3。

表 3 各站主要作物生长期内多年平均降雨 单位：mm

站点	冬小麦	夏玉米	棉花
北京	105.4	511.0	545.9
天津	107.7	445.9	479.7
石家庄	130.1	409.1	445.6
郑州	225.1	412.5	464.3
济南	171.0	500.6	544.0
太原	120.8	324.6	359.5

根据式 (2)，计算出各站点的净灌溉需水量，见表 4。由表 4 可见，气候变暖仍然是对冬小麦的灌溉需水量影响最大。北京将由目前的 389.2mm 上升到 403.2 ~ 528.7mm；天津由目前的 371.8mm 上升到 385.2 ~ 505.5mm；石家庄由目前的 324.0mm 上升到 335.9 ~ 441.3mm；郑州由目前的 261.9mm 上升到 274.8 ~ 390.8mm；济南由目前的 412.3mm 上升到 427.7 ~ 565.3mm；太原由目前的 324.9mm 上升到 336.6 ~ 439.4mm。气候变暖将使各地冬小麦的缺水形势进一步加剧，其中济南和北京尤为严重。

表 4 气候变暖对主要作物灌溉需水量的影响

作物	温度增幅/	灌溉需水量/mm					
		北京	天津	石家庄	郑州	济南	太原
冬小麦	0 <sup>a</sup>	389.2	371.8	324.0	261.9	412.3	324.9
	1	403.2	385.2	385.9	274.8	427.7	336.6
	2	431.2	412.0	359.4	300.7	458.5	359.9
	3	473.1	452.1	394.6	339.3	504.5	394.4
	4	528.7	505.5	441.3	390.8	565.3	439.4
夏玉米	0	- 85.3 <sup>b</sup>	- 6.4	9.2	19.2	- 15.8	86.2
	1	- 77.8	1.4	16.3	26.7	- 7.5	93.1
	2	- 62.7	17.0	30.7	41.5	9.1	106.7
	3	- 39.9	40.7	52.4	64.1	34.2	127.1
	4	- 8.8	73.0	82.2	95.0	68.3	154.6
棉花	0	- 61.5	17.8	25.9	15.6	6.1	105.2
	1	- 52.7	26.9	34.2	24.0	15.7	113.2
	2	- 35.3	44.9	50.6	40.9	34.9	128.9
	3	- 9.1	72.1	75.2	66.2	63.6	152.2
	4	26.2	108.8	108.6	100.6	102.4	183.3

注：a 温度增幅为 0 时的多年平均灌溉需水量；b 灌溉需水量为负值表明降雨量大于需水量；

由于华北地区夏玉米和棉花生长与雨季同步，气候变暖对北京地区夏玉米灌溉需水量的影响相对较小。其中对北京地区夏玉米灌溉需水量的影响最小。即使在未来温度增加 4 的情况下，天然降雨仍能完全满足夏玉米生长的需要；在温度增加 3 时降雨仍能满足棉花生长的需要，增加 4 时将缺水 26.2mm。说明北京地区夏玉米和棉花抵御未来气候变暖不利影响的能力较强。相反，由于太原夏玉米和棉花生长期内降雨量在各站点中最低，因此，尽管气候变暖对该地区作物需水量的影响最小，但较差的降水条件将使本地区面临严重的缺水形势。玉米灌溉需水量将由现状的 86.2mm 增加到 93.1 ~ 154.6mm；棉花由现状的 105.2mm 增加到 113.2 ~ 183.3mm。而其它地区即使在温度增加 4 时，也

只增加一次灌水即可保证作物正常生长及目前的产量水平。

根据华北地区目前的种植结构<sup>[2]</sup>，冬小麦、夏玉米和棉花的播种面积依次为 1248.593、815.448、171.51 万  $\text{hm}^2$ ，据此估算，当温度上升 1~4℃ 时，将使整个地区冬小麦的灌溉需水量增加 14.7~191 亿  $\text{m}^3$ ；夏玉米的灌溉需水量增加 5.87~68.6 亿  $\text{m}^3$ ；棉花的灌溉需水量增加 1.35~16.5 亿  $\text{m}^3$ 。因此，未来气候变暖将使华北地区业已紧张的水资源供需矛盾更加突出。

#### 4 结论

在假定未来温度上升 1~4℃ 的情景下，研究了气候变化对华北地区主要作物需水量及灌溉需水量的影响。结果表明，不同作物的需水量对气候变暖的响应存在差异。其中对冬小麦需水量的影响最大，对棉花的影响次之，对夏玉米的影响最小。说明冬小麦对未来气候变暖的适应能力很差，而夏玉米和棉花的适应能力相对较强。

从华北地区总体来看，当温度上升 1℃ 时，冬小麦、夏玉米、棉花需水量将增加 11.7~15.0mm、6.9~8.3mm、7.9~9.6mm；当温度上升 2℃ 时，3 种作物的需水量依次增加 35.0~46.3mm、20.5~24.9mm、23.6~28.8mm；当温度上升 3℃ 时，3 种作物的需水量依次增加 69.5~92.2mm、40.9~50.0mm、47~57.5mm；当温度上升 4℃ 时，3 种作物的需水量依次增加 114.5~153.0mm、68.3~84.1mm、78.0~96.2mm。

气候变化对作物需水量的影响存在一定地域性差异。其中对济南的作物需水量影响最大。当温度增加 1~4℃ 时，冬小麦、夏玉米、棉花需水量将依次增加 15.4~153.0mm、8.3~84.1mm、9.6~96.2mm。气候变化对太原的作物需水量影响最小。当温度上升 1~4℃ 时，3 种作物的需水量将依次增加 11.7~114.5mm、6.9~68.3mm、7.9~78.0mm，比济南分别低 24%~25%、17%~19% 和 18%~19%，相当于低 3.7%~38.5mm、1.4~15.8mm、1.7~18.2mm。

由于天然降水条件的差异，华北各地在抵御未来气候变暖不利影响方面有所差异。各地冬小麦在抵御气候变化不利影响方面能力均较差，其中济南和北京尤为严重。北京地区夏玉米和棉花抵御未来气候变暖不利影响的能力较强。而太原夏玉米和棉花抵御未来气候变暖不利影响的能力较差。据此，各地应因地制宜，依据不同作物需水量对气候变化响应的差异，调整作物种植结构，压缩受气候影响大的作物的种植比例，以减缓对水资源需求的压力。

根据华北地区目前的种植结构估算，温度上升 1~4℃ 将使整个地区冬小麦的灌溉需水增加 14.7~191 亿  $\text{m}^3$ ；夏玉米的灌溉需水增加 5.87~68.6 亿  $\text{m}^3$ ；棉花的灌溉需水增加 1.35~16.5 亿  $\text{m}^3$ 。3 种作物的净灌溉需水量将增加 21.92~276.1 亿  $\text{m}^3$ ，这将使华北地区业已紧张的水资源供需矛盾将更加突出。因此，未来气候变暖引起的用水增加不容忽视。

致谢：本文所用气象资料由国家气象局气候资料中心提供，在此表示衷心感谢！

#### 参 考 文 献：

- [1] 林而达. 气候变化与农业可持续发展 [M]. 北京：北京出版社，2001.
- [2] 中国农业统计年鉴 [M]. 北京：中国统计出版社，2001.
- [3] 吴景社，李英能. 我国 21 世纪农业用水危机与节水农业 [J]. 农业工程学报，1998，14 (3)：95 - 101.
- [4] Allen R G, Pereira L S, Dirks R et al. Crop evapotranspiration guidelines for computing crop water requirements [M]. FAO Irrig And Drain Paper 56. Rome, 1998.
- [5] 陈玉民，郭国双. 中国主要农作物需水量等值线图研究 [M]. 北京：中国农业科技出版社，1993.
- [6] 刘钰，蔡林根. 参照蒸发量的新定义及计算方法的对比 [J]. 水利学报，1997，(6)：27 - 33.
- [7] IPCC WGI. Climate change: the IPCC scientific assessment [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1990.

(下转第 87 页)

- [ 4 ] Xu ZX, Li JY, Ito K. Clustering stochastic point process model for flood risk analysis [J], Stochastic Hydrology and Hydraulics, 1998, 12 (1): 53 - 64.
- [ 5 ] 董聪, 夏人伟. 现代结构系统可靠性评估理论研究进展 [J]. 力学进展. 1995, (4): 537 - 547.
- [ 6 ] Lucien Duckstein, Istvan Bogardi. Application of Reliability Theory to Hydraulic Engineering Design [J]. Journal of Hydraulic Engineering Design, ASCE, 1981, (7): 799 - 815.
- [ 7 ] [日] 松尾稔, 万国胜, 等译. 地基工程学可靠性设计的理论与实际 [M]. 北京: 人民交通出版社, 1990.

## Over-standard integrated risk analysis of flood control system

WANG Xin-yu<sup>1</sup>, ZHANG Xiang<sup>2</sup>, LAI Guo-wei<sup>2</sup>

(1. Changjiang Water Resources Commission, Wuhan 430010, China; 2. Wuhan University, Wuhan 430072, China)

**Abstract:** Compound Poisson model and reliability theory are respectively used to calculate hydrology risk rate and engineering structure reliability. The hydrology risk and the engineering risk are considered as compatible events. The selective probability is used to calculate the integrated risk rate of compatible events. The case study illustrates that these method are practical in integrated risk analysis of flood control system and the results of integrated risk analysis are useful in decision making for flood control planning.

**Key words:** hydrology risk; engineering structure reliability; integrated risk analysis

(上接第 82 页)

## Impact of climate change on water requirement of main crops in North China

LIU Xiao-ying, LIN Er-da

(Agrometeorology Institute, Chinese Academy of Agricultural Science, Beijing 100081)

**Abstract:** This paper examined the impact of given temperature scenario on water requirement of the main crops in North China. It shows that climate change will have great impact on water requirement of winter wheat, followed by cotton, and the least impact on summer maize. It indicates that winter wheat shows poorly in adapting the future climate change. Contrarily, summer maize and cotton show relatively adaptability to the climate. The magnitude of impact is spatial dependent. Climate change will have the greatest impact on crops in Jinan, Shandong Province and will have the least impact on crops in Taiyuan, Shanxi Province. According to the current planting planning in North China, the given temperature scenario will cause an additional water requirement of  $1.47 \times 10^9 \sim 19.1 \times 10^9 \text{ m}^3$  for winter wheat,  $5.87 \times 10^8 \sim 68.6 \times 10^8 \text{ m}^3$  for summer maize and  $1.35 \times 10^8 \sim 16.5 \times 10^8 \text{ m}^3$  for cotton, making the situation of water shortage more severe.

**Key words:** climate change; temperature; crop water requirement; North China