

1957—2017年京津冀主要作物水分利用效率及节水潜力分析

崔秋利

(河南中天招标代理有限公司, 郑州 450000)

摘要: 水资源短缺以及农业用水效率不高制约着京津冀一体化国家战略的实施。【目的】提高主要作物水分利用效率, 缓解京津冀地区农业水资源矛盾。【方法】基于FAO推荐的Penman-Monteith公式及有效降水计算公式估算了1957—2017年京津冀地区冬小麦、夏玉米的耗水量及水分利用效率以及冬小麦、夏玉米的节水潜力。【结果】冬小麦、夏玉米水分利用效率呈逐年线性增长趋势。冬小麦、夏玉米水分利用效率仍有20%~30%的提升空间, 在产量不变的前提下, 京津冀地区可节约水量43.6亿~60.4亿 m^3 。冬小麦节水潜力高于夏玉米。【结论】可通过改善土壤条件, 优化灌溉管理以及秸秆覆盖等措施提高冬小麦及夏玉米的水分利用效率。

关键词: 节水潜力; 水分利用效率; 京津冀地区; 冬小麦; 夏玉米

中图分类号: TV93

文献标志码: A

doi: 10.13522/j.cnki.gggs.20190282

崔秋利. 1957—2017年京津冀主要作物水分利用效率及节水潜力分析[J]. 灌溉排水学报, 2020, 39(2): 93-98.

CUI Qiuli. Analysis of WUE for main crops and water-saving potential in the Beijing-Tianjin-Hebei region in 1957—2015 [J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2020, 39(2): 93-98.

0 引言

水资源短缺以及农业用水效率不高制约着京津冀一体化国家战略的实施。合理量化主要农作物的节水潜力对于指导京津冀地区农业节水发展, 促进京津冀一体化战略实施具有一定指导意义。节水潜力可以分为“资源型”节水潜力和“效率型”潜力。“资源型”节水潜力通常指通过对供水进行改造和调整以减少水分蒸发和深层渗漏可节约的水量^[1]; “效率型”节水潜力通常指通过提高作物水分利用效率(WUE)可节约的水量。提高主要农作物的水分利用效率已成为解决该地区水资源矛盾的一条重要途径^[2-4]。

目前大量学者对作物水分利用效率进行了研究。商彦蕊等^[5]分析了石家庄地区主要农作物的理论灌溉需水量和实际灌溉水量, 指出以现有的作物种植结构和产量水平为前提, 石家庄冬小麦、夏玉米和棉花3种主要农作物的灌溉节水潜力为3亿~9亿 m^3 。丁志宏等^[6]分析了海河流域“工程型”、“结构型”和“效率型”节水潜力, 三者分别为43.83亿、12.46亿和7.49亿 m^3 。房全孝等^[7]指出华北地区小麦-玉米二熟制水分敏感期为孕穗期, 播前灌溉的产量效应差异明显。以往节水潜力的计算大多依赖于现状条件, 对于主要作物WUE的长期变化趋势以及各种措施条件下未来WUE可达的上限值关注较少。

本研究基于灌溉条件下的作物需水量以及雨养条件下的有效降水估算了1957—2017年京津冀地区冬小麦和夏玉米耗水量及水分利用效率, 结合国内外相关研究提出未来海河流域冬小麦及夏玉米水分利用效率可以达到的上限值, 估算了京津冀地区“效率型”节水潜力的范围, 并提出提高水分利用效率的措施。研究对于指导京津冀地区农业节水实践具有一定意义。

1 方法与数据

1.1 冬小麦、夏玉米耗水量计算

首先计算冬小麦和夏玉米逐年消耗的水资源量。对于灌溉区, 单位面积冬小麦或夏玉米生育期内消耗的水资源量用逐日参考作物蒸散量(ET_0)乘以作物系数(K_c)的方法进行估算。

$$C_{wu} = \sum K_c ET_0, \quad (1)$$

式中: C_{wu} 为灌溉区单位面积冬小麦或夏玉米生育期内所消耗的水资源量(mm); ET_0 为参考作物蒸散量(mm/d); K_c 为作物系数, 为作物生长阶段的函数。作物生长阶段划分为生育初期, 快速生长期, 生育中期和生育末期4个阶段。生育初期和生育中期, K_c 为常量, 二者分别等于 K_{cni} 和 K_{cmid} , 快速生育期, K_c 从 K_{cni} 到 K_{cmid} 线性变化, 生育末期 K_c 由 K_{cmid} 线性变化为 K_{cend} 。冬小麦和夏玉米各生育期长度以及作物系数初始值来源于FAO, 考虑到不同年份不同区域气象条件不同, 本研究对各年、各地区生育中期和生育末期的作物系数值进行了修正。

收稿日期: 2019-07-03

作者简介: 崔秋利(1981-), 女, 工程师, 主要从事水利工程管理方面研究。E-mail: zthenan@163.com

参考作物蒸散量通过 FAO 推荐的 Penman-Monteith 公式^[8]进行计算。

冬小麦和夏玉米生育中期、生育末期作物系数的修正方法^[6]为:

$$K_{\text{cmid}}(\text{或 } K_{\text{cend}}) = K_{\text{ctable}} + [0.04(u_2 - 2) - 0.004(RH_{\min} - 45)](h/3)^{0.3}, \quad (2)$$

式中: K_{cmid} 为作物生育中期的作物系数; K_{cend} 为作物生育末期的作物系数; K_{ctable} 为 FAO 作物系数表中推荐的作物生育中期或生育末期的作物系数值; u_2 指的是生长中期或末期作物表面以上 2 m 高度处的日平均风速 (m/s), 用于 $1 \text{ m/s} < u_2 < 6 \text{ m/s}$; $RH_{\min}$ 指的是生育中期或生育末期的日最小相对湿度的平均值 (%), 用于 $20\% < RH_{\min} < 80\%$; h 指的是作物生育中期或生育末期的平均株高 (m), 用于 $0.1 < h < 10$ 。

对于雨养区, 单位面积冬小麦和夏玉米生育期内所消耗的水资源量通过有效降水与作物需水量之间的较小值估算。有效降水的计算参考了美国环保部土壤保持局推荐的方法^[9-10], 该方法在国内得到了广泛应用^[11-13]。有效降水逐旬进行计算, 计算式为:

$$P_e = \begin{cases} \frac{P(4.17 - 0.02P)}{4.17} & (P < 83) \\ 41.7 + 0.1P & (P \geq 83) \end{cases}, \quad (3)$$

式中: P_e 为旬有效降水量 (mm); P 为旬降水量 (mm)。

1.2 冬小麦、夏玉米水分利用效率及“效率型”节水潜力

本研究旨在讨论作物水分利用效率提高所引起的作物需水量的减少, 并未考虑充分利用灌溉水和降水对应的“资源型”节水潜力。作物水分利用效率通常表示为产量与耗水量的比值^[14]。对于冬小麦或夏玉米, 其水分利用效率计算式:

$$WUE_i = \frac{0.1 \times \sum_j Y_{ij}}{\sum_j C_{wuij} A_{ij} \beta_{ij} + \sum_j P_{eij} A_{ij} (1 - \beta_{ij})}, \quad (4)$$

式中: WUE_i 表示作物 i 的水分利用效率 (kg/m^3); C_{wuij} 表示 j 地区灌溉条件下作物 i 的耗水量 (mm), 本研究采用作物需水量估算; A_{ij} 表示 j 地区作物 i 的播种面积 (hm^2); β_{ij} 表示 j 地区作物 i 的灌溉面积占比。灌溉面积与雨养面积来源于 Portmann 等^[15]整理的数据库, 灌溉面积由灌溉面积占二者之和的比例获得。对于河北地区, 冬小麦和夏玉米的灌溉面积占比分别取 1.0 和 0.75; 对于京津地区, 冬小麦和夏玉米的灌溉面积分别取 1.0 和 0.76。

“效率型”节水潜力指通过提高水分利用效率 (WUE) 带来的节水潜力, 其计算式为:

$$\Delta W = \frac{Y}{WUE} - \frac{Y}{WUE_p}, \quad (5)$$

式中: ΔW 表示节水潜力 (m^3); Y 表示总产量 (kg); WUE 表示水分利用效率 (kg/m^3); WUE_p 表示潜在在水

分利用效率 (kg/m^3)。潜在水分利用效率参考了国内外相关文献。

1.3 数据来源

气象数据来源于气象数据共享网 (<http://data.cmn.cn/>), 数据包括了 1957—2017 年逐日最高气温, 最低气温, 2 m 高处的风速, 平均相对湿度及日照时间。作物生育期参数和作物系数的初始值来自联合国粮农组织 (FAO)。农业统计数据以省划分, 通过中国农业农村部种植管理司下属的中国农业种植网 (<http://zzys.agri.gov.cn/nongqing.aspx>) 以及各省市统计年鉴获得, 数据包括 1957—2017 年各省冬小麦及夏玉米的统计单产, 播种面积以及总产量。各作物灌溉面积数据来源于 Portmann 等^[15]整理的 MIRCA2000 数据库, 数据于 2013 年更新。

2 结果与分析

2.1 冬小麦、夏玉米耗水量变化趋势

冬小麦、夏玉米耗水量及产量的变化趋势见图 1。

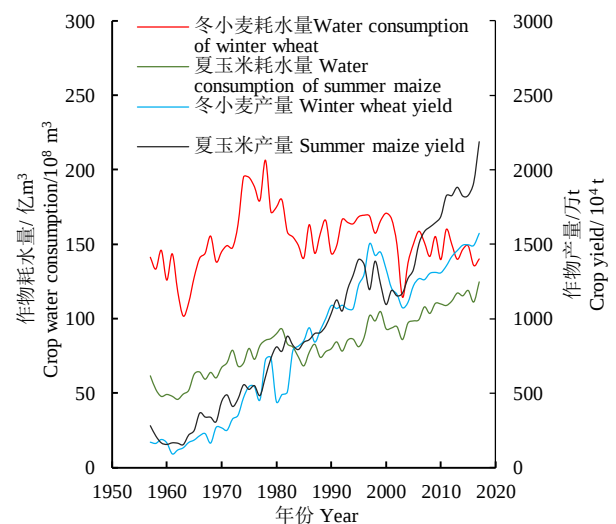


图 1 冬小麦、夏玉米耗水量及产量 (1957—2017)

Fig.1 Water consumption of winter wheat and summer maize (1957—2017)

由图 1 可以看出, 1957—2017 年冬小麦耗水量总体无显著变化趋势 ($r=0.108$, $P>0.05$), 多年平均耗水量约 152.94 亿 m^3 。冬小麦耗水量曾在 1961—1981 年出现剧烈波动, 其中, 1961 年冬小麦耗水量达到极小值 101.72 亿 m^3 , 1961—1978 年快速上升, 1978 年达到极大值 206.4 亿 m^3 , 之后逐渐下降至正常水平。冬小麦耗水量与产量相关性不高 ($r=0.18$)。1957—2017 年夏玉米耗水量呈显著上升趋势 ($r=0.936$, $P<0.001$), 2017 年夏玉米耗水量达到最大值 (124.68 亿 m^3), 相比较 1957 年上升了 103%。夏玉米耗水量的上升趋势可以用其播种面积的逐年扩大来解释, 而研究期内冬小麦播种面积呈先增加后减少趋势^[16]。

研究期内，冬小麦和夏玉米的产量均呈显著增长趋势。2017 年冬小麦产量为 1 573 万 t，较 1957 年上升了 82.4%，2017 年夏玉米产量为 2 188 万 t，较 1957 年上升了 68.0%。冬小麦、夏玉米产量的上升幅度均远高于冬小麦、夏玉米耗水量的变化幅度。说明研究期内冬小麦和夏玉米的水分利用效率提高了。

2.2 冬小麦、夏玉米 WUE 变化趋势

冬小麦、夏玉米 WUE 的变化趋势见图 2。从图 2 可以看出，冬小麦和夏玉米的 WUE 均呈线性增长趋势。冬小麦年均变化幅度为 0.018 kg/m³。夏玉米年变化幅度为 0.024 kg/m³。2017 年冬小麦 WUE 为 1.12 kg/m³，比 2007 年上升了 83.5%；夏玉米水分利用效率为 1.76 kg/m³，比 2007 年上升了 28.6%。另外，夏玉米水分利用效率自 1957—2017 年均高于冬小麦，说明消耗相同体积的水，夏玉米能够获得更高的产量。

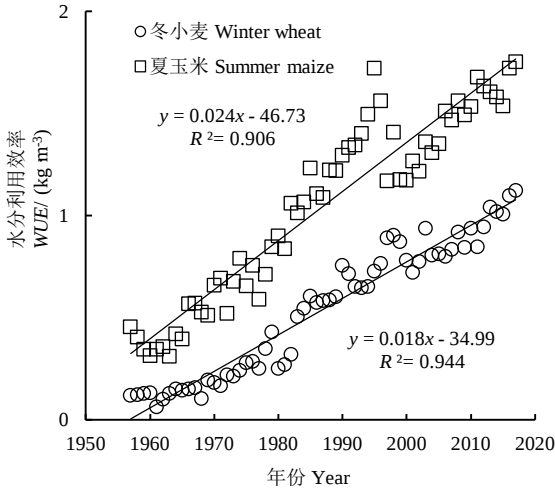


图 2 1957—2017 冬小麦、夏玉米水分利用效率

Fig.2 WUE of winter wheat and summer maize (1957—2017)

2.3 不同地区冬小麦、夏玉米 WUE 的差异

以 2013—2017 年为例分析了各地区冬小麦、夏玉米 WUE 的差异，结果见图 3。由图 3 可以看出，冬小麦水分利用效率河北 (1.07 kg/m³) > 北京 (0.81 kg/m³) > 天津 (0.80 kg/m³)；3 个地区的标准差分别为 0.05，0.03 和 0.02 kg/m³。其中河北水分利用效率高于京津冀地区平均值 (1.06 kg/m³)，北京和天津地区低于平均值。对于夏玉米，水分利用效率北京 (1.81 kg/m³) > 河北 (1.65 kg/m³) > 天津 (1.48 kg/m³)；3 个地区的标准差分别为 0.09、0.18 和 0.13 kg/m³。其中北京和河北水分利用效率高于京津冀地区平均值 (1.64 kg/m³)，天津地区低于平均值。

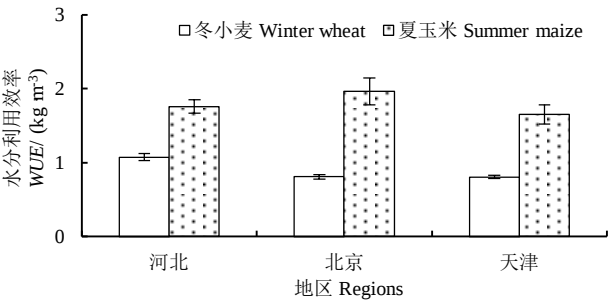


图 3 各地区水分利用效率的比较

Fig.3 Comparison of water use efficiency in different regions

2.4 冬小麦、夏玉米“效率型”节水潜力

尽管我国京津冀地区冬小麦和夏玉米水分利用效率得到了显著提高，其仍然低于世界发达国家^[11]，主要体现在灌溉管理方式上。本研究依据国内外大量关于冬小麦和夏玉米水分利用效率的试验研究，认为二者还有 20%~30%的提升空间，可通过优化生育期内的灌溉方式，减少无效的地面蒸发等方式提高水分利用效率。

表 1 冬小麦、夏玉米“效率型”节水潜力分析

Table 1 Efficiency-based water-saving potential of winter wheat and summer maize

作物 Crops	地区 Regions	现状 (2017 年) Current (2017)		提高 20% Improving 20%		提高 30% Improving 30%	
		WUE/ (kg m ⁻³)	产量 Yield/ (10 ⁴ t)	WUE/ (kg·m ⁻³)	节水量 Water saving content/ (10 ⁸ m ³)	WUE/ (kg m ⁻³)	节水量 Water saving content/ (10 ⁸ m ³)
冬小麦	河北	1.07	1 435.4	1.27	21.1	1.38	30.1
	北京	0.81	11.4		0.5		0.6
	天津	0.8	55.5		2.6		2.9
	汇总	1.06	1 502.3		24.2		33.6
夏玉米	河北	1.65	1 767.3	1.97	17.4	2.13	24.1
	北京	1.81	50.2		0.2		0.4
	天津	1.48	109.7		1.8		2.3
	汇总	1.64	1 927.2		19.4		26.8

本研究假设未来一段时间内产量不变的前提下冬小麦和夏玉米水分利用效率分别提高 20%和 30%，估算了冬小麦和夏玉米可节约的水资源量，结果如表 1 所示。由表 1 可知，2017 年冬小麦、夏玉米的 WUE

分别为 1.06 kg/m³和 1.64 kg/m³。冬小麦 WUE 整体提高 20% (增长至 1.27 kg/m³)，此时冬小麦可节约水量 24.2 亿 m³，其中，河北、北京、天津分别可节约水量 21.1 亿、0.5 亿和 2.6 亿 m³。如果提升 30% (增长

至 1.38 kg/m^3), 冬小麦可节约水量 33.6 亿 m^3 , 其中, 河北、北京、天津分别可节约水量 30.1 亿 、 0.6 亿 和 2.9 亿 m^3 。夏玉米 WUE 整体提高 20% (至 1.97 kg/m^3), 此时夏玉米可节约水量 19.4 亿 m^3 , 其中, 河北、北京、天津分别可节约水量 17.4 亿 、 0.2 亿 和 1.8 亿 m^3 。如果提升 30% (增长至 2.13 kg/m^3), 夏玉米可节约水量 26.8 亿 m^3 。其中, 河北、北京、天津分别可节约水量 24.1 亿 、 0.4 亿 和 2.3 亿 m^3 。因此, 在产量不变的前提下, 如果冬小麦和夏玉米水分利用效率提高 $20\% \sim 30\%$, 京津冀地区可节约水量 $43.6 \text{ 亿} \sim 60.4 \text{ 亿 m}^3$ 。尽管冬小麦的产量低于夏玉米, 冬小麦与夏玉米相比具有更高的节水潜力。通过提高作物水分利用效率节约的水资源量可以有效减少地下水的开采, 缓解京津冀地区的水资源供需矛盾。

3 讨论

3.1 本研究与其他研究的对比

段爱旺等^[17]根据 20 世纪 80 年代我国 4 422 个站点的 10 种作物的耗水量和产量数据, 用加权平均法得到了全国灌溉农田粮食作物的平均水分利用效率约为 1.1 kg/m^3 。本研究计算了 2008—2015 年京津冀地区冬小麦和夏玉米的水分利用效率, 二者分别为 1.06 kg/m^3 和 1.64 kg/m^3 , 平均水分利用效率为 1.32 kg/m^3 , 高于其研究, 主要因为近年来冬小麦和夏玉米水分利用效率均有显著增长。Fan 等^[18]基于多元回归分析估算了地面沟灌和微灌条件下的水分利用效率, 指出小麦水分利用效率的取值范围为 $0.54 \sim 1.73 \text{ kg/m}^3$, 均值为 1.13 kg/m^3 , 冬小麦距离最大水分利用效率还有 30.4% 的空间, 本研究结果与其接近。Wang 等^[19]指出华北地区冬小麦耗水量达到 343.8 mm 时水分利用效率达到最大值, 为 1.29 kg/m^3 , 低于本研究对最大水分利用效率的估计, 主要因为其基于栾城试验站 1984—1996 年的观测数据, 到近 5 a 冬小麦水分利用效率有了显著提高。Sun 等^[20]指出华北平原冬小麦水分利用效率的取值范围为 $0.97 \sim 1.83 \text{ kg/m}^3$ 。Zhang 等^[21]指出华北平原冬小麦 WUE 的取值范围为 $0.93 \sim 1.51 \text{ kg/m}^3$, 指出可以通过减少灌溉的方式提高冬小麦的水分利用效率。刘增进等^[22]认为北方冬小麦 WUE 介于 $0.87 \sim 1.72 \text{ kg/m}^3$ 。闫永奎等^[23]研究了冬小麦拔节期水分胁迫以及复水条件下的水分利用效率, 结果介于 $1.15 \sim 1.68 \text{ kg/m}^3$ 。肖俊夫等^[24]研究了不同灌水处理对冬小麦水分利用效率的影响, 结果显示 WUE 介于 $1.38 \sim 1.51 \text{ kg/m}^3$ 。以上研究说明本文提出的 WUE 提高 30% , 其达到 1.38 kg/m^3 是可行的。

李小利等^[25]研究指出华北地区滴灌施肥条件下夏玉米水分利用效率范围为 $1.747 \sim 2.518 \text{ kg/m}^3$ 。孟毅等^[26]研究指出麦秆覆盖条件下, 夏玉米水分利用效

率为 $2.0 \sim 2.48 \text{ kg/m}^3$ 。其证实了本研究假设未来夏玉米水分利用效率提高 $20\% \sim 30\%$ ($1.97 \sim 2.13 \text{ kg/m}^3$) 是可行的。Saseendran 等^[27]研究了美国中部平原半干旱环境下灌溉对玉米 WUE 的影响, 结果表明 WUE 最大为 1.62 kg/m^3 , 其最大值低于本研究, 主要因为该地区夏玉米的生育期长度约为 140 d , 长于我国华北平原, 与本研究相比, 较长的生育期长度使得夏玉米耗水量增多, WUE 降低。

3.2 提高水分利用效率的措施

作物水分利用效率表示产量与耗水量的比值。首先可以通过提高作物单产来提高水分利用效率。例如, 改进作物的品种, 长期以来, 正是因为冬小麦、夏玉米品种的不断改善^[28], 使得其产量长期处于增长状态。其次, 可以通过优化田间管理减少无效水的消耗。例如, 通过改变耕作方式改善土壤的物理化学特性, 通过优化灌溉制度提高灌溉水的利用效率, 或者通过覆膜和秸秆覆盖的方式减少地面蒸发, 从而减少株间土壤的耗水量。Hou 等^[29]基于宁夏南部 3 a 的田间试验指出不耕作与深耕交替可改善土壤的物理化学特性, 提高冬小麦产量 $9.6\% \sim 10.7\%$ 和提高水分利用效率 $7.2\% \sim 7.7\%$ 。Olk 等^[30]研究指出覆膜以及增加灌溉水量可以增加玉米的水分利用效率。李双双等^[13]分析了华北平原冬小麦与夏玉米轮作条件下灌溉、腾发量、作物生长及 WUE 之间的关系, 指出可通过覆膜的方式减少土壤蒸发, 而且可通过减少灌水频率和灌水量的方式提高其水分利用效率。孟毅等^[26]研究指出通过秸秆覆盖的方式减少地面蒸发及增加地表温度, 覆盖量 4 120 kg/hm^2 时夏玉米水分利用效率最优。

3.3 研究存在的不足

本研究仅考虑了冬小麦和夏玉米水分利用效率提高所带来的“效率型”节水潜力, 对于提高灌溉渠系水以及降水的利用带来的“资源型”节水潜力本研究暂时并未考虑, “资源型”节水潜力在农业节水中的意义同样不可忽视。

对于灌溉面积与雨养面积的区分, 由于未找到京津冀地区雨养面积和灌溉面积的调查资料, 本研究采用了 Portmann 等^[15]整理的数据库, 该数据库于 2013 年更新。近年来随着我国京津冀地区灌溉面积的扩大, 实际的灌溉面积占比会大于该调查值, 进而引起估算的作物耗水量和水分利用效率偏低, 结果可能会造成估算的节水潜力偏大。

1970 年以前, 华北一些地区用水车灌溉, 取用地下水量较少, 灌溉面积占比可能低于当前, 同时存在灌溉能力不足的问题。当前京津冀的许多区域仍然存在灌水不足的问题, 冬小麦很多情况下只能灌一水, 特别是井灌区属于明显的非充分灌溉。本研究假设灌溉区冬小麦全部为充分灌溉状态, 按此确定用水量会

导致估算的作物耗水量和水分利用效率偏高, 结果可能会造成估算的节水潜力偏小。

4 结 论

1) 1957 年以来, 冬小麦、夏玉米 *WUE* 逐步提高, 呈线性增长趋势。夏玉米 *WUE* 高于冬小麦。

2) 不同地区 *WUE* 显著不同。以近 5 a 为例, 冬小麦河北地区 *WUE* 最高, 夏玉米北京地区 *WUE* 最高。

3) 产量不变的前提下, 如果冬小麦和夏玉米水分利用效率提高 20%~30%, 京津冀地区可节约水量 43.6 亿~60.4 亿 m^3 , 冬小麦节水潜力高于夏玉米。

参考文献:

- [1] 尹剑, 王会肖, 刘海军, 等. 不同水文频率下关中灌区农业节水潜力研究[J]. 中国农业生态学报, 2014, 22(2): 246-252.
YIN Jian, WANG Huixiao, LIU haijun, et al. Agricultural water-saving potential in Guanzhong Irrigation Area in different hydrological years[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2014, 22(2): 246-252.
- [2] 刘杰云, 邱虎森, 张文正, 等. 节水灌溉对农田土壤温室气体排放的影响[J]. 灌溉排水学报, 2019, 38(6): 1-7.
LIU Jieyun, QIU Husen, ZHANG Wenzheng, et al. Response of greenhouse gas emission to water-saving irrigation in crop-land: A review[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2019, 38(6): 1-7.
- [3] 范田亿, 张翔. 2000—2014 年中国粮食主产区植被水分利用效率时空演变特征研究[J]. 灌溉排水学报, 2019, 38(3): 99-107.
FAN Tianyi, ZHANG Xiang. Spatial-temporal variations of water use efficiency of crops in main agricultural production regions of China from 2000 to 2014[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2019, 38(3): 99-107.
- [4] 辛琪, 林少喆, 王妮娜, 等. 间隔交替波涌灌溉对冬小麦土壤水分与水分利用效率的影响[J]. 灌溉排水学报, 2019, 38(1): 21-25.
XIN Qi, LIN Shaozhe, WANG Nina, et al. Effect of alternate surge flow irrigation on soil moisture and water use efficiency of winter wheat field[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2019, 38(1): 21-25.
- [5] 商彦蕊, 李会昌, 任春霞. 石家庄市主要农作物灌溉节水潜力研究[J]. 中国人口资源与环境, 2006, 16(2): 95-98.
SHANG Yanrui, LI Huichang, REN Chunxia. Study on irrigation water-saving potential of the three main crops in Shijiazhuang[J]. China Population Resources and Environment, 2006, 16(2): 95-98.
- [6] 丁志宏, 徐向广, 付晓亮. 基于分区的海河流域农业节水潜力评估[J]. 中国农村水利水电, 2018(7): 47-51.
DING Zhihong, XU Xiangguang, FU Xiaoliang. The evaluation of agricultural water-saving potentials in the Haihe River Basin based on the agricultural water-saving zones[J]. China Rural Water and Hydropower, 2018(7): 47-51.
- [7] 房全孝, 王建林, 于舜章. 华北平原小麦-玉米两熟制节水潜力与灌溉对策[J]. 农业工程学报, 2011, 27(7): 37-44.
FANG Xiaoquan, WANG Jianlin, YU Shunzhang. Water-saving potential and irrigation strategies for wheat-maize double cropping system in the North China Plain[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2011, 27(7): 37-44.
- [8] ALLEN R G, PEREIRA L S, RAES D, et al. Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirement [R]. Rome: Food and Agriculture Organization, 1998.
- [9] SMITH M. CROPWAT: a computer program for irrigation planning and management, FAO irrigation and drainage paper 46 [M]. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 1992.
- [10] DÖLL P, SIEBERT S. Global modeling of irrigation water requirements [J]. Water Resources Research, 2002, 38(4): 1037.
- [11] 王玉宝, 吴普特, 孙世坤, 等. 我国粮食虚拟水流动对水资源和区域经济的影响[J]. 农业机械学报, 2015, 46(10): 208-215.
WANG Yubao, WU Pute, SUN Shikun, et al. Impact of virtual water flows of grain on water resources and regional economy in China[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(10): 208-215.
- [12] 陈超, 庞艳梅, 潘学标, 等. 1961—2012 年中国棉花需水量的变化特征[J]. 自然资源学报, 2015(12): 2 107-2 119.
CHEN Chao, PANG Yanmei, PAN Xuebiao, et al. Variation Characteristics of water requirement of cotton in China during 1961-2012[J]. Journal of Natural Resources, 2015 (12): 2 107-2 119.
- [13] 李双双, 杨赛霓, 刘宪锋. 西南地区水稻水分亏缺率时空变化特征及其影响因素[J]. 生态学报, 2015, 36(18): 5 798-5 808.
LI Shuangshuang, YANG Saini, LIU Xianfeng. Spatiotemporal variability of rice water deficiency during 1960-2013 and its influencing factors in Southwestern China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(18): 5 798-5 808.
- [14] HUSSAIN G, AL-JALOUD A A, AL-SHAMMARY S F, et al. Effect of saline irrigation on the biomass yield and the protein, nitrogen, phosphorus and potassium composition of alfalfa in a plot experiment[J]. Journal of Plant Nutrition, 1995, 18(11): 2 389-2 408.
- [15] PORTMANN F T, SIEBERT S, DÖLL P. MIRCA 2000—Global Monthly Irrigated and Rainfed Crop Areas around the Year 2000: A New High-Resolution Data Set for Agricultural and Hydrological Modeling[J]. Global Biogeochem Cycles, 2010, 24, GB1011.
- [16] HAN Y, JIA D, ZHUO L, et al. Assessing the water footprint of wheat and maize in Haihe River Basin, northern China (1956–2015) [J]. Water, 2018, 10(7): 867.
- [17] 段爱旺, 张寄阳. 中国灌溉农田粮食作物水分利用效率的研究[J]. 农业工程学报, 2000, 16(4): 41-44.
DUAN Aiwang, ZHANG Jiyang. Water use efficiency of grain crops in irrigated farmland in China[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2000, 16(4): 41-44.
- [18] FAN Y, WANG C, NAN Z. Determining water use efficiency of wheat and cotton: A meta-regression analysis[J]. Agricultural Water Management, 2018, 199: 48-60.
- [19] WANG H, ZHANG L, DAWES W R, et al. Improving water use efficiency of irrigated crops in the North China Plain-measurements and

- modeling[J]. *Agricultural Water Management*, 2001, 48: 151-167.
- [20] SUN H, LIU C, ZHANG X, et al. Effect of irrigation on water balance, yield and *WUE* of winter wheat in the North China Plain[J]. *Agricultural Water Management*, 2006, 85: 211-218.
- [21] ZHANG J, SUI X, LI B, et al. An improved water-use efficiency for winter wheat grown under reduced irrigation[J]. *Field Crops Research*, 1998, 59(2): 91-98.
- [22] 刘增进, 李宝萍, 李远华, 等. 冬小麦水分利用效率与最优灌溉制度的研究[J]. *农业工程学报*, 2004, 20(4): 58-63.
- LIU Zengjin, LI Baoping, LI Yuanhua, et al. Research on the water use efficiency and optimal irrigation schedule of the winter wheat[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2004, 20(4): 58-63.
- [23] 闫永奎, 郝卫平, 梅旭荣, 等. 拔节期水分胁迫—复水对冬小麦干物质积累和水分利用效率的影响[J]. *中国农业气象*, 2011, 32(2): 190-195.
- YAN Yongkuan, HAO Weiping, MEI Xurong, et al. Effects of water stress-rewatering at jointing stage on dry matter accumulation and *WUE* of winter wheat[J]. *China Journal of Agrometeorology*, 2011, 32(2): 190-195.
- [24] 肖俊夫, 刘战东, 段爱旺, 等. 不同灌水处理对冬小麦产量及水分利用效率的影响研究[J]. *灌溉排水学报*, 2006, 25(2): 20-23.
- XIAO Junfu, LIU Zhandong, DUAN Aiwang, et al. Studies on effects of irrigation systems on the grain yield constituents and water use efficiency of winter wheat[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2006, 25(2): 20-23.
- [25] 李小利, 李昊儒, 郝卫平, 等. 滴灌施肥对华北小麦-玉米产量和水分利用效率的影响[J]. *灌溉排水学报*, 2018, 37(4): 18-28.
- LI Xiaoli, LI Haoru, HAO Weiping, et al. Impact of drip fertigation on yields and water use efficiency of wheat-maize rotation in North China[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2018, 37(4): 18-28.
- [26] 孟毅, 蔡焕杰, 王健, 等. 麦秆覆盖对夏玉米的生长及水分利用效率的影响[J]. *西北农林科技大学学报(自然科学版)*, 2005, 33(6): 131-135.
- MENG Yi, CAI Huanjie, WANG Jian, et al. Effect of straw mulching on the growth of summer maize and soil water utilization[J]. *Journal of Northwest A&F University (Natural Science Edition)*, 2005, 33(6): 131-135.
- [27] SASEENDRAN S A, AHUJA L R, NIELSEN D C, et al. Use of crop simulation models to evaluate limited irrigation management options for corn in a semiarid environment[J]. *Water Resources Research*, 2008, W00E02.
- [28] 郑殿升. 中国冬小麦生产上种植面积超 66.7 万 hm^2 的品种及其分析[J]. *植物遗传自然科学*, 2001, 2(3): 19-55.
- ZHENG Diansheng. Analysis on wheat varieties with annual planting area larger than 667000 hm^2 in China[J]. *Journal of Plant Genetic Resources*, 2001, 2(3): 19-55.
- [29] HOU X, LI R, JIA Z, et al. Effects of rotational tillage practices on soil properties, winter wheat yields and water-use efficiency in semi-arid areas of north-west China[J]. *Field Crops Research*, 2012, 129: 7-13.
- [30] OLK J A, HOWELL T A, EVETT S R. Effect of mulch, irrigation, and soil type on water use and yield of maize[J]. *Soil and Tillage Research*, 50(2): 137-147.

Analysis of *WUE* for Main Crops and Water-saving Potential in the Beijing-Tianjin-Hebei Region in 1957—2015

CUI Qiuli

(Henan Zhongtian Tendering Agency Co., Ltd., Zhengzhou 450000, China)

Abstract: 【Objective】Water shortage and low agricultural water use efficiency have restricted the implement of national strategy for Beijing-Tianjin-Hebei integration. The purpose of this paper is to improve the water use efficiency (*WUE*) of main crops and alleviate water conflicts of the Beijing-Tianjin-Hebei region. 【Method】This study estimated the water consumption and water use efficiency of winter wheat and summer maize in the Beijing-Tianjin-Hebei region from 1957 to 2017 and the corresponding water-saving potential based on the FAO: Penman-Monteith Formula and the effective precipitation. 【Result】The *WUE* of winter wheat and summer maize showed linear increasing trends. According to previous relevant experimental work, the *WUE* could be improved by 20%~30%. The volume of water-saving is about 4.36 billion m^3 to 6.04 billion m^3 . The water-saving potential of winter wheat is higher than that of summer maize. 【Conclusion】The *WUE* can be increased by improving soil conditions, optimizing irrigation management and straw mulching.

Key words: water-saving potential; water use efficiency; Beijing-Tianjin-Hebei region; winter wheat; summer maize

责任编辑: 陆红飞