

DOI: 10.14042/j.cnki.32.1309.2019.05.008

作物相对水分利用效率与理论节水潜力

代小平^{1,2}, 周雯晶³, 韩宇平^{1,4}, 窦 明⁵, 冯 吉¹, Svensson Jesper⁶

(1. 华北水利水电大学水利学院, 河南 郑州 450046; 2. 河南省节水农业重点实验室, 河南 郑州 450046;
3. 黄河勘测规划设计研究院有限公司, 河南 郑州 450003; 4. 水资源高效利用与保障工程河南省协同创新中心,
河南 郑州 450046; 5. 郑州大学水利科学与工程学院, 河南 郑州 450001;
6. Smith School of Enterprise and the Environment, University of Oxford, Oxford OX13QY)

摘要: 作物水分利用效率是评价农业用水效率的重要指标, 由于气候差异, 采用作物水分利用效率评价不同区域的用水效率可能存在一定误差, 尚缺乏深入研究。基于潜在水分利用效率指标和气象数据, 计算了2014年中国小麦、玉米和水稻在充分灌溉条件下的潜在水分利用效率, 分析了区域气候差异对作物水分利用效率的影响, 提出了相对水分利用效率和理论节水潜力的概念和计算方法, 并进行了实例研究。结果表明: 各类作物在不同站点的潜在水分利用效率的标准差为0.49~1.01 kg/m³, 多数作物潜在水分利用效率的空间差异大于实际水分利用效率的空间差异; 主要作物的平均相对水分利用效率为50.7%, 其理论节水潜力为884.8~4 064.5 m³/hm²; 作物水分利用效率和广义节水潜力指标可能高估或低估作物的用水效率和节水潜力。研究认为在比较区域间作物的水分利用效率时不能忽略气候差异的影响; 由于考虑了区域气候差异, 相对水分利用效率和理论节水潜力指标更合理。

关键词: 相对水分利用效率; 理论节水潜力; 粮食作物

中图分类号: S27 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-6791(2019)05-0682-09

农业水资源利用效率和节水潜力分析是农业节水、水资源评价、水资源规划与管理领域的重要问题。近年来, 作物生产水足迹^[1]、农业广义水资源利用系数^[2]等新指标被应用于农业水资源利用效率评价中, 但作物水分利用效率依然是重要的评价指标。提高作物水分利用效率被认为是节约农业水资源、提高粮食产量、促进水资源可持续利用的重要措施^[3-4]。学术界基本认同发达国家的水分利用效率已接近或超过2.0 kg/m³、中国的水分利用效率低于国外先进水平的观点^[4], 由此得出中国灌溉用水浪费、节水潜力大的结论。但具有不同气候条件的国家或地区的水分利用效率能否进行直接比较值得进一步研究。

作物水分利用效率(Water Use Efficiency, WUE)指单位水量消耗所生产的经济产品数量^[4], 与作物水分生产率(Crop Water Use Efficiency)的概念相似^[5]。由于作物水分利用效率受农作物、管理水平、灌溉技术、自然条件等的影响^[6-7], 部分学者指出用该指标比较和评价农业用水效率不一定合理^[8-9], 但尚缺乏深入研究。作物产量和耗水量均受到气候的影响, 不同地区的气候差异会对作物产量和耗水量产生影响, 进而影响区域内可能获得的最大作物水分利用效率。由于作物可能获得的最大水分利用效率不同, 区域间作物水分利用效率的差异可能更多来源于气候差异, 而非灌溉效率和生产水平差异, 差异可能只是因为气候。因此通过比较不同区域的作物水分利用效率来直接分析某区域的农业用水效率和节水潜力可能存在误差。具有不同气候的国家或地区间的作物水分利用效率是否可以进行横向比较, 如果气候对作物水分利用效率的影响不能忽略, 如何比较不同区域作物的用水效率, 进而计算作物的节水潜力, 都是需深入研究的内容。

本文借鉴作物潜在水分利用效率的概念, 以2014年中国主要粮食作物为例, 分析区域气候差异对作物

收稿日期: 2019-01-21; 网络出版日期: 2019-07-29

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1309.P.20190726.1729.029.html>

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51609082); “948”计划资助项目(201328)

作者简介: 代小平(1982—), 男, 四川泸州人, 副教授, 博士, 主要从事农业水资源方面研究。

E-mail: xiaop-dai@163.com

通信作者: 韩宇平, E-mail: han0118@163.com

水分利用效率的影响, 提出衡量区域作物用水效率的新指标——作物相对水分利用效率, 以及新的节水潜力计算方法, 并通过实例研究验证其合理性。

1 研究方法

1.1 作物潜在水分利用效率的定义及计算方法

作物潜在水分利用效率是基于作物光温生产潜力计算的作物水分利用效率^[10-11]。其计算公式如下^[11]：

$$E_{yp} = f(Q)f(T) \left[\frac{1}{ET_a} - K_y \left(\frac{1}{ET_a} - \frac{1}{ET_m} \right) \right] \quad (1)$$

$$K_y = \frac{1 - \frac{Y_a}{Y_m}}{1 - \frac{ET_a}{ET_m}} \quad (2)$$

式中： E_{yp} 为作物的潜在水分利用效率， kg/m^3 ； $f(Q)$ 为光合生产潜力， kg/hm^2 ； $f(T)$ 为温度影响函数； K_y 为产量反应系数； Y_m 为作物实际耗水量 ET_a 等于作物需水量 ET_m 时的最高产量， kg/hm^2 ； Y_a 为作物的实际产量， kg/hm^2 。

在充分灌溉条件下，当作物的实际耗水量等于作物需水量时，产量达到最高产量，此时作物的潜在水分利用效率为

$$E_{ypc} = \frac{f(Q)f(T)}{ET_m} \quad (3)$$

式中： E_{ypc} 为充分灌溉条件下作物的潜在水分利用效率， kg/m^3 。由于光温生产潜力是灌溉农业的产量上限，作物潜在水分利用效率是充分灌溉条件下作物水分利用效率的上限。在实际生产中，农民通常采用充分灌溉以追求最大产量，因此，本文以充分灌溉条件下的作物潜在水分利用效率分析气候差异对作物水分利用效率的影响。

光合生产潜力根据下式计算^[12]：

$$f(Q) = \varepsilon(1 - \alpha)(1 - \beta)(1 - \rho)(1 - \gamma)\phi(1 - \omega)(1 - x)^{-1} H^{-1} S \sum Q \quad (4)$$

式中： $\sum Q$ 为作物生长季内太阳总辐射量， J/m^2 ； ε 为光合有效辐射占总辐射的比例，在实例计算中取 0.49^[13-16]； α 为作物反射率，取 0.23^[13]； β 为作物群体对太阳辐射的漏射率，取 0.06^[13-16]； ρ 为作物非光合器官对太阳辐射的无效吸收，取 0.1^[13-14,16]； γ 为光饱和和限制率，在自然条件下一般不构成限制，取 0^[13,16]； ϕ 为量子转化效率，取 0.224^[13,16]； ω 为作物呼吸损耗率，取 0.3^[13-16]； x 为作物灰分含量，取 0.08^[13-16]； H 为形成 1 kg 干物质所需的热量，取 17.2 MJ/kg^[15]； S 为作物经济系数，玉米取 0.4^[15]，小麦取 0.45^[17]，水稻取 0.45^[14]。

温度影响订正函数分为喜凉作物(小麦)和喜温作物(水稻、玉米)两种表达式^[13]：

喜凉作物为

$$f(T) = \begin{cases} 0 & t < 3 \text{ } ^\circ\text{C} \\ \frac{t}{32} & 3 \text{ } ^\circ\text{C} \leq t < 21 \text{ } ^\circ\text{C} \\ 2 - \frac{t}{30} & 21 \text{ } ^\circ\text{C} \leq t \leq 32 \text{ } ^\circ\text{C} \\ 0 & t > 32 \text{ } ^\circ\text{C} \end{cases} \quad (5)$$

喜温作物为

$$f(T) = \begin{cases} 0 & t < 6 \text{ } ^\circ\text{C} \\ 0.027t - 0.162 & 6 \text{ } ^\circ\text{C} \leq t < 21 \text{ } ^\circ\text{C} \\ 0.086t - 1.41 & 21 \text{ } ^\circ\text{C} \leq t < 28 \text{ } ^\circ\text{C} \\ 1 & 28 \text{ } ^\circ\text{C} \leq t < 32 \text{ } ^\circ\text{C} \\ -0.083t + 3.67 & 32 \text{ } ^\circ\text{C} \leq t < 44 \text{ } ^\circ\text{C} \\ 0 & t \geq 44 \text{ } ^\circ\text{C} \end{cases} \quad (6)$$

式中： t 为生育期内各月平均气温， $^\circ\text{C}$ 。

作物潜在蒸发蒸腾量采用单作物系数法计算，参考作物潜在蒸发蒸腾量采用联合国粮农组织 (FAO) 推荐的 Penman-Monteith 公式计算^[18]。

1.2 作物相对水分利用效率的定义和计算方法

将作物在充分灌溉条件下的相对水分利用效率定义为：某区域充分灌溉作物的实际水分利用效率和潜在水分利用效率的比值。该指标反映某区域内作物的实际水分利用效率与潜在水分利用效率的差异。其计算公式为

$$P_r = \frac{E_{yac}}{E_{ypc}} \times 100\% \quad (7)$$

式中： P_r 为某区域的作物在某年的相对水分利用效率， $\%$ ； E_{yac} 为某区域的充分灌溉作物在某年的实际水分利用效率， kg/m^3 。潜在水分利用效率和实际水分利用效率的差异由作物的灌溉效率、生产效率等因素决定。作物的相对水分利用效率可近似度量作物的田间灌溉效率和生产效率。

1.3 理论节水潜力的定义和计算方法

农业节水潜力可分为狭义节水潜力和广义节水潜力。狭义节水潜力指现状灌溉用水量与灌溉需水量的差值。广义节水潜力主要通过提高作物水分利用效率实现^[19]，通常选择先进地区的作物水分利用效率作为参考值进行计算。根据通常的分析方法^[4]，定义其计算公式为

$$P_s = \frac{1}{E_{yac}} - \frac{1}{E_{ys}} \quad (8)$$

式中： P_s 为某区域内某种作物在某年的广义节水潜力， m^3/kg ； E_{ys} 为先进地区作物的水分利用效率， kg/m^3 。

广义节水潜力的计算方法未考虑区域间气候差异，如果先进地区和评价区域的气候差异很大时，可能存在较大误差。潜在水分利用效率是充分灌溉条件下作物在某区域的最大水分利用效率，是较理想的节水潜力计算的评价标准。基于潜在水分利用效率，定义充分灌溉条件下理论节水潜力的概念为：充分灌溉作物单位产量的实际耗水量与理论耗水量的差值，根据作物的实际水分利用效率和潜在水分利用效率计算。其计算公式为

$$P_l = \frac{1}{E_{yac}} - \frac{1}{E_{ypc}} \quad (9)$$

式中： P_l 为某区域内某种作物在某年的理论节水潜力， m^3/kg 。该节水潜力为作物单位产量的节水潜力，结合单位面积上的作物产量，可计算得到单位面积作物的理论节水潜力。

2 研究区和资料来源

2.1 研究区域

玉米、水稻、小麦是中国播种面积和总产量排名前三的粮食作物^[20]，本文选择这三类作物进行实例分析。中国玉米种植区域集中分布在东北向西南走向的狭长玉米带上，包括北方春播玉米区、黄淮海夏播玉米

区及西南山地丘陵玉米区。本文选择种植时间较为固定的北方春播玉米区与黄淮海夏播玉米区进行研究^[21](见图1(a))。中国种植春小麦和冬小麦, 其中冬小麦常年种植面积和产量达到总播种面积和总产量的90%以上, 因此选择冬小麦种植区进行研究(见图1(b))。选择的水稻研究区域为南方水稻种植区和东北水稻种植区, 这两区的水稻占全国水稻种植面积的96%, 占水稻总产量的94%(见图1(c))。

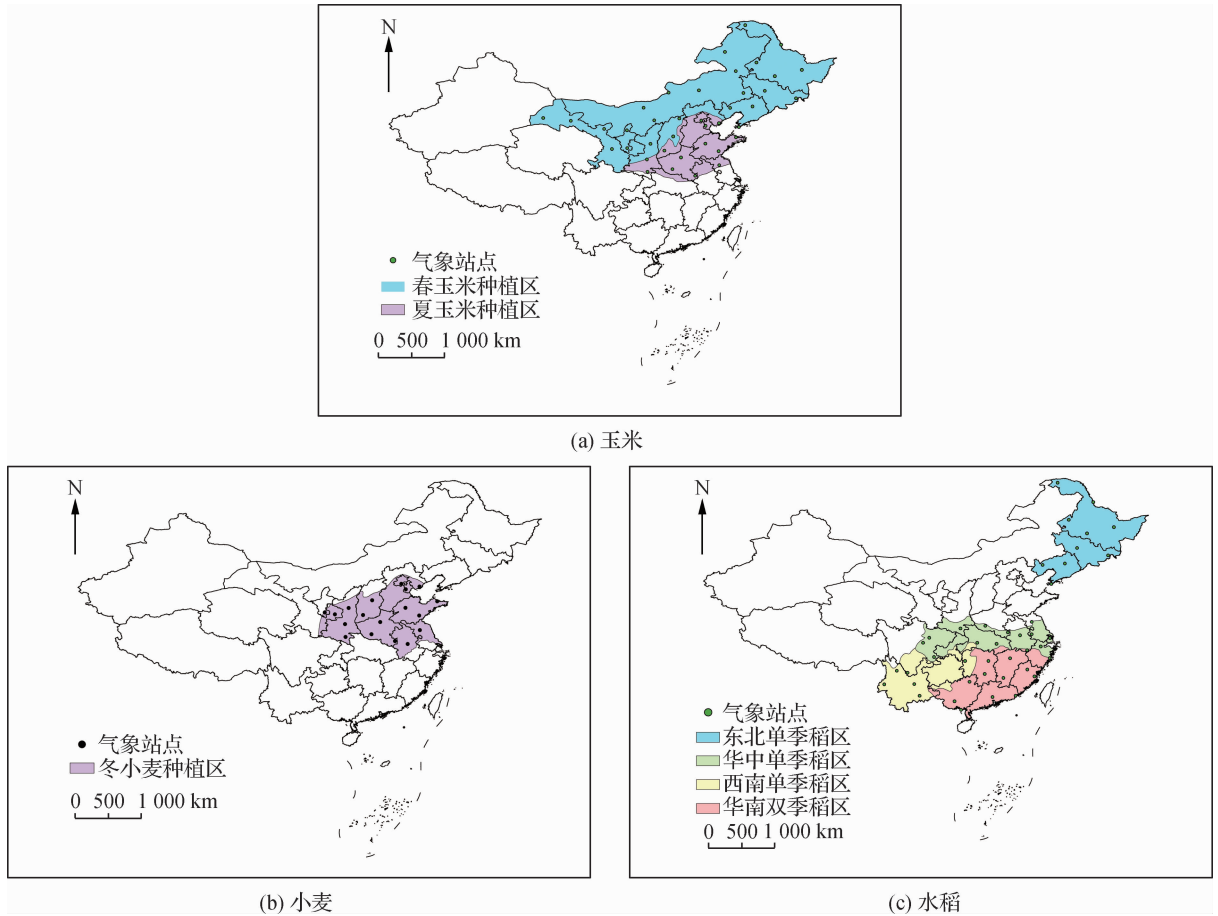


图1 研究区域

Fig.1 Research area

2.2 数据来源

从中国气象数据网获取研究区域的气象站点在2014年的气象数据进行研究, 包括日平均气温、最低温度、最高温度、日照时数、相对湿度、风速、降雨量、太阳辐射等。共收集了66个监测站点的气象数据, 各类作物涵盖的站点数量为: 春玉米18个, 夏玉米13个, 冬小麦17个, 早稻和双季晚稻13个, 单季稻29个。

作物生育期、作物系数以及播种范围根据参考文献[22-23]获得。

作物的实际水分利用效率通过整理与本研究的的气象站点相吻合或相近研究区域的灌溉试验研究成果获取。为方便与充分灌溉条件下的潜在水分利用效率进行对比分析, 本文选取的实际水分利用效率为充分灌溉、肥力充足并且无其他限制条件下不同试验处理的作物水分利用效率的平均值。由于同一地区在不同水文年的作物水分利用效率存在差异, 为了减少水文年型以及其他因素对结果的影响, 参考已有研究的处理方法^[24,26], 若文献中涉及多个研究年份, 实际水分利用效率采用各研究年份的平均值。

3 结果及分析

3.1 中国主要粮食作物的潜在水分利用效率

表 1 为 2014 年中国部分站点主要粮食作物的潜在水分利用效率。其中, 夏玉米的潜在水分利用效率最高, 早稻最低。主要粮食作物在不同站点的潜在水分利用效率的标准差为 $0.49 \sim 1.01 \text{ kg/m}^3$, 平均标准差为 0.64 kg/m^3 。其中, 冬小麦的潜在水分利用效率的空间差异最大, 夏玉米最小。主要粮食作物的潜在水分利用效率的标准差占均值的比例为 $11\% \sim 30\%$ 。除夏玉米外, 其他作物的潜在水分利用效率的标准差占均值的比例均超过了 15% , 表明多数作物的潜在水分利用效率的空间差异较大, 直接比较不同地区的作物水分利用效率不一定合理。

表 1 2014 年中国部分站点主要粮食作物的潜在水分利用效率
Table 1 Potential WUE of main grain crops in some sites of China in 2014

作物类型	均值/ $(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	标准差/ $(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	(标准差/均值)/%	站点数/个
夏玉米	4.29	0.49	11.4	13
冬小麦	3.37	1.01	30.0	17
春玉米	3.06	0.58	19.0	18
双季晚稻	2.91	0.51	17.5	13
单季稻	2.68	0.62	23.1	29
早稻	2.68	0.64	23.9	13
作物平均	3.17	0.64	20.2	—

3.2 中国主要粮食作物的相对水分利用效率

表 2 为 2014 年中国部分站点主要粮食作物的潜在水分利用效率、实际水分利用效率和相对水分利用效率。表 2 中主要粮食作物的实际水分利用效率值均高于全国灌溉试验站在 1980—1988 年的平均值^[4], 但低于 1991—2016 年的文献调查值^[24]。表 2 中的作物实际水分利用效率只是部分站点在充分灌溉条件下的平均值, 受区域气候的影响, 局部区域的作物水分利用效率有可能高于全国平均值。而文献[24]中的数据为所有试验处理下的平均值, 因此高于本文整理的充分灌溉条件下的实际水分利用效率是合理的。

表 2 2014 年中国部分站点主要粮食作物的潜在、实际水分利用效率和相对水分利用效率
Table 2 Potential WUE, actual WUE, and relative WUE of main grain crops in some sites of China in 2014

作物类型	潜在水分利用效率			实际水分利用效率 ^[25]			相对水分利用效率			站点数/个
	均值/ $(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	标准差/ $(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	排序	均值/ $(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	标准差/ $(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	排序	均值/%	标准差/%	排序	
春玉米	3.16	0.58	2	2.16	0.22	1	69.5	9.5	1	6
早稻	2.18	0.17	6	1.17	0.34	5	53.4	14.0	2	4
单季稻	2.58	0.49	5	1.26	0.24	4	49.5	9.5	3	11
冬小麦	2.96	0.76	3	1.38	0.27	3	48.3	10.1	4	8
夏玉米	4.31	0.2	1	2.04	0.25	2	47.4	6.4	5	4
双季晚稻	2.76	0.42	4	0.98	0.17	6	36.3	9.0	6	5
作物平均	2.99	0.44	—	1.50	0.25	—	50.7	9.8	—	—

注: 部分站点缺少实际水分利用效率数据, 在计算相对水分利用效率时去除; 所有排序均依据均值的大小。

从表 2 可见, 春玉米的平均相对水分利用效率最高, 双季晚稻最低。主要粮食作物的平均相对水分利用

效率为 50.7%。各类作物的相对水分利用效率在各站点间的标准差较大。其中, 早稻的相对水分利用效率的空间差异最大, 夏玉米最小。除早稻和夏玉米外, 其他作物的潜在水分利用效率在各站点的标准差均大于实际水分利用效率。表明对这些作物而言, 在比较不同区域的作物水分利用效率时, 不能忽略气候差异的影响。

除了双季晚稻外, 各类作物的潜在水分利用效率排序和实际水分利用效率排序相差不大, 表明实际水分利用效率受潜在水分利用效率的制约。

无论采用实际水分利用效率还是相对水分利用效率评价用水效率, 均为春玉米的用水效率最高, 双季晚稻最低。但在评价方法改变后, 除了春玉米和双季晚稻, 其他作物的排序均有变化。排序可能升高也可能降低, 表明实际水分利用效率指标可能低估或者高估用水效率。夏玉米和早稻的排序变化最大, 表明这两种作物采用实际水分利用效率评价用水效率具有较大误差。

假设同一地区在轮作不同作物时的灌溉方式、生产水平相似, 轮作作物的相对水分利用效率应该相差不大。冬小麦和夏玉米的种植区域相同, 两种作物的相对水分利用效率差异为 0.9%, 但早稻和双季晚稻的相对水分利用效率差异达 17.1%。表明相对水分利用效率具有一定的区域一致性, 但还需要进一步的研究检验。

3.3 中国主要粮食作物的节水潜力

2014 年中国部分站点的理论节水潜力、广义节水潜力及其差值的计算结果见表 3。主要粮食作物的先进水分利用效率根据 Zwart 和 Bastiaanssen^[26] 综述的 1977—2002 年文献报道的作物水分利用效率的 95% 分位值确定, 即玉米 2.7 kg/m³, 小麦 1.7 kg/m³, 水稻 1.6 kg/m³。单位面积的理论节水潜力根据单位产品的理论节水潜力和全国平均单位面积粮食产量计算。

表 3 2014 年中国部分站点主要粮食作物的水分利用效率和节水潜力

Table 3 Water use efficiency and water saving potential of main grain crops in some sites of China in 2014

作物类型	水分利用效率均值/ (kg · m ⁻³)			单位产品的节水潜力均值/ (m ³ · kg ⁻¹)			单位面积 粮食产量/ (kg · hm ⁻²)	单位面积的节水潜力均值/ (m ³ · hm ⁻²)			站点数/ 个
	潜在	广义	实际	理论	广义	差值		理论	广义	差值	
双季晚稻	2.76	1.6	0.98	0.68	0.42	0.26	5 977.2	4 064.5	2 510.4	1 554.1	6
冬小麦	2.96	1.7	1.38	0.39	0.16	0.23	5 321.8	2 075.5	851.5	1 224.0	4
早稻	2.18	1.6	1.17	0.46	0.29	0.17	5 869.1	2 699.8	1 702.0	997.7	4
单季稻	2.58	1.6	1.26	0.42	0.20	0.22	7 406.7	3 110.8	1 481.3	1 629.5	11
夏玉米	4.31	2.7	2.04	0.26	0.13	0.13	5 511.2	1 433.0	716.5	716.5	4
春玉米	3.16	2.7	2.16	0.14	0.10	0.04	6 320.3	884.8	632.0	252.8	6

注: 节水潜力差值 = 理论节水潜力 - 广义节水潜力; 单位面积的理论节水潜力 = 单位产品的理论节水潜力 × 全国平均单位面积粮食产量; 单位面积粮食产量数据来自 2015 年中国农村统计年鉴。其中, 双季晚稻、冬小麦和早稻为全国平均值; 单季稻为中稻或一季晚稻的全局平均值; 夏玉米为东部和中部玉米单产的平均值; 春玉米为东北玉米的单产平均值。

从表 3 可见, 除双季晚稻外, 其他种类水稻和小麦的理论节水潜力相当, 均大于玉米。双季晚稻的理论节水潜力最大, 春玉米最小。主要作物单位产品的理论节水潜力介于 0.14 ~ 0.68 m³/kg 之间, 其单位面积的理论节水潜力介于 884.8 ~ 4 064.5 m³/hm² 之间。除春玉米外, 其他作物的理论节水潜力和广义节水潜力的差异大于 0.1 m³/kg 或 700 m³/hm²。表明在计算春玉米以外作物的节水潜力时, 需要考虑两种计算方法的合理性。

进一步比较 2014 年中国主要粮食作物单位产品节水潜力的最大值和最小值(表 4), 发现冬小麦和单季稻在两个站点的广义节水潜力为负值。其中, 一个站点的潜在水分利用效率是所有站点中最高的, 另外一个站点采用了在土壤中添加斜发沸石的特殊处理方法。这些站点的作物实际水分利用效率均小于潜在水分利用效率, 本文认为在特殊地区或者特殊种植措施下实际水分利用效率高于先进水分利用效率是可能的。表明对

这些站点而言, 先进水分利用效率的取值偏低, 广义节水潜力指标将会低估作物的节水潜力。春玉米在部分站点的理论节水潜力小于广义节水潜力, 其因为先进水分利用效率高于潜在水分利用效率。表明对这些站点而言, 作物的先进水分利用效率取值偏高, 广义节水潜力指标将会高估作物的节水潜力。

由此可见, 以先进地区的作物水分利用效率作为评价标准计算节水潜力时, 难于选择适宜的标准值, 而理论节水潜力指标以潜在水分利用效率为评价标准, 有效地避开了这个难题。

表 4 2014 年中国部分站点主要粮食作物的节水潜力均值、最大值和最小值

Table 4 Average, maximum, and minimum value of water saving potential of main grain crops in some sites of China in 2014

作物类型	理论节水潜力/($\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$)			广义节水潜力/($\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$)			节水潜力差值(理论 - 广义)/($\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$)			站点数/ 个
	均值	最大值	最小值	均值	最大值	最小值	均值	最大值	最小值	
双季晚稻	0.68	1.05	0.47	0.42	0.80	0.23	0.26	0.34	0.21	6
冬小麦	0.39	0.64	0.29	0.16	0.35	-0.02	0.23	0.33	0.06	4
早稻	0.46	0.85	0.24	0.29	0.67	0.04	0.17	0.2	0.13	4
单季稻	0.42	0.64	0.19	0.20	0.51	-0.04	0.23	0.33	0.12	11
夏玉米	0.26	0.36	0.20	0.13	0.22	0.07	0.14	0.15	0.12	4
春玉米	0.14	0.17	0.06	0.10	0.16	0.04	0.04	0.10	-0.09	6

4 结 论

中国主要粮食作物潜在水分利用效率的空间差异较大, 其中冬小麦的潜在水分利用效率的空间差异最大, 夏玉米最小。除早稻和夏玉米外, 主要作物潜在水分利用效率的空间差异大于实际水分利用效率。气候差异对实际水分利用效率具有较大影响, 采用实际水分利用效率评价不同区域的农业用水效率存在一定误差。

中国主要粮食作物的平均相对水分利用效率为 50.7%。与相对水分利用效率相比, 作物水分利用效率指标存在高估或者低估用水效率的情况。采用实际水分利用效率评价夏玉米和早稻的用水效率具有更大误差。由于考虑了区域气候差异, 相对水分利用效率能更合理地评价区域用水效率。

中国主要粮食作物的理论节水潜力介于 $884.8 \sim 4\,064.5 \text{ m}^3/\text{hm}^2$ 之间。由于缺乏适宜的评价标准, 广义节水潜力指标可能低估或高估作物的节水潜力。理论节水潜力以区域潜在水分利用效率为标准进行计算, 避免了确定适宜的先进水分利用效率的困难, 可更合理地反映区域的节水潜力。

受数据所限, 本文未能确定气候差异对不同区域作物水分利用效率的影响程度, 还有待进一步的研究阐明。不同作物具有不同的生理特性, 但本文在计算光温生产潜力时部分参数采用的是同一值, 使得计算结果存在一定误差。本文采用的实际水分利用效率为不同年份的实验值, 与潜在水分利用效率的计算年份不一致, 导致相对水分利用效率和节水潜力的计算结果也存在一定误差。今后还需进一步研究水文年型对作物潜在水分利用效率、相对水分利用效率和节水潜力的影响。

本文提出了不同区域的作物水分利用效率是否能进行直接比较的问题, 初步分析了区域气候差异对作物水分利用效率的影响, 可为探索合理的农业用水效率评价方法提供借鉴。提出的充分灌溉条件下的潜在水分利用效率、相对水分利用效率和理论节水潜力的概念和计算方法为农业用水效率和节水潜力评价提供了一个新的思路, 可为区域作物布局、水土资源规划提供参考。

参考文献:

- [1] BRAUMAN K A, SIEBERT S, FOLEY J A. Improvements in crop water productivity increase water sustainability and food security-a global analysis[J]. Environmental Research Letters, 2013, 8(2): 024030.
- [2] 吴普特, 孙世坤, 王玉宝, 等. 作物生产水足迹量化方法与评价研究[J]. 水利学报, 2017, 48(6): 651-660. (WU P T,

- SUN S K, WANG Y B, et al. Research on the quantification methods for water footprint of crop production[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2017, 48(6): 651-660. (in Chinese))
- [3] 操信春, 邵光成, 王小军, 等. 中国农业广义水资源利用系数及时空格局分析[J]. *水科学进展*, 2017, 28(1): 14-21. (CAO X C, SHAO G C, WANG X J, et al. Generalized water efficiency and strategic implications for food security and water management: a case study of grain production in China[J]. *Advances in Water Science*, 2017, 28(1): 14-21. (in Chinese))
- [4] 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 A W, ZHANG J Y. 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. (in Chinese))
- [5] 中华人民共和国水利部. 农村水利技术术语: SL 56—2005[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 2013: 11. (Ministry of Water Resources. Technical terminology for rural water conservancy: SL 56—2005 [S]. Beijing: China Water & Power Press, 2013: 11. (in Chinese))
- [6] SUN S K, ZHANG C F, LI X L, et al. Sensitivity of crop water productivity to the variation of agricultural and climatic factors: a study of Hetao irrigation district, China[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2017, 142: 2562-2569.
- [7] 裴婷婷, 李小雁, 吴华武, 等. 黄土高原植被水分利用效率对气候和植被指数的敏感性研究[J]. *农业工程学报*, 2019, 35(5): 119-125. (PEI T T, LI X Y, WU H W, et al. Sensitivity of vegetation water use efficiency to climate and vegetation index in Loess Plateau, China[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2019, 35(5): 119-125. (in Chinese))
- [8] ZOEBL D. Is water productivity a useful concept in agricultural water management? [J]. *Agricultural Water Management*, 2006, 84(3): 265-273.
- [9] 崔远来, 熊佳. 灌溉水利用效率指标研究进展[J]. *水科学进展*, 2009, 20(4): 590-598. (CUI Y L, XIONG J. Advances in assessment indicators of irrigation water use efficiency[J]. *Advances in Water Science*, 2009, 20(4): 590-598. (in Chinese))
- [10] 王会肖, 刘昌明. 作物水分利用效率内涵及研究进展[J]. *水科学进展*, 2000, 11(1): 99-104. (WANG H X, LIU C M. Advances in crop water use efficiency research[J]. *Advances in Water Science*, 2000, 11(1): 99-104. (in Chinese))
- [11] 陶毓汾, 王立祥, 韩仕峰, 等. 中国北方旱农地区水分生产潜力及开发[M]. 北京: 气象出版社, 1993: 103-106. (TAO Y F, WANG L X, HAN S F, et al. Water use efficiency of dry farming region in Northern China and its exploitation [M]. Beijing: China Meteorological Press, 1993: 103-106. (in Chinese))
- [12] 郭建平. 气候变化对农业气候资源有效性的影响评估[M]. 北京: 气象出版社, 2016. (GUO J P. Evaluation of effect of climate change on the efficiency of agricultural climate resources [M]. Beijing: China Meteorological Press, 2016. (in Chinese))
- [13] 谢云, 王晓岚, 林燕. 近40年中国东部地区夏秋粮作物农业气候生产潜力时空变化[J]. *资源科学*, 2003, 25(2): 7-13. (XIE Y, WANG X L, LIN Y. Temporal and spatial variation of climatic potential productivity for grain crops in Eastern China within forty years[J]. *Resources Science*, 2003, 25(2): 7-13. (in Chinese))
- [14] 王宗明, 张柏, 张树清, 等. 松嫩平原农业气候生产潜力及自然资源利用率研究[J]. *中国农业气象*, 2005(1): 2-7. (WANG Z M, ZHANG B, ZHANG S Q, et al. Studies on agricultural climatic potential productivity and natural resources utilization ratio in Songnen Plain of Heilongjiang Province[J]. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 2005(1): 2-7. (in Chinese))
- [15] 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. (in Chinese))
- [16] 马新明, 刘木森, 陈伟强, 等. 基于GIS的河南省小麦自然生产优势区域评价研究[J]. *麦类作物学报*, 2006(6): 104-107. (MA X M, LIU M S, CHEN W Q, et al. Estimation of dominant regions in wheat natural production using GIS[J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2006(6): 104-107. (in Chinese))
- [17] 莫兴国, 林忠辉, 李宏轩, 等. 基于过程模型的河北平原冬小麦产量和蒸散量模拟[J]. *地理研究*, 2004, 23(5): 623-631. (MO X G, LIN Z H, LI H X, et al. Simulation of winter wheat yield and evapotranspiration with process-based model and remote sensing data in the Hebei Plain[J]. *Geographical Research*, 2004, 23(5): 623-631. (in Chinese))
- [18] ALLEN R G, PEREIRA L S, RAES D, et al. Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements[R]. Rome: Irrigation and Drainage paper 56, FAO, 1998.
- [19] 段爱旺, 信乃谔, 王立祥. 节水潜力的定义和确定方法[J]. *灌溉排水学报*, 2002, 21(2): 25-28. (DUAN A W, XIN N Q, WANG L X. The definition and calculation of agricultural water saving potential[J]. *Irrigation and Drainage*, 2002, 21(2): 25-28. (in Chinese))

- [20] 中华人民共和国国家统计局. 2017 中国统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2017. (National Bureau of Statistics of the People's Republic of China. 2017 China statistical yearbook[M]. Beijing: China Statistics Press, 2017. (in Chinese))
- [21] 张岩. 中国黄淮海夏玉米区玉米光温生产潜力时空演变特征模拟分析[D]. 南京: 南京农业大学, 2013. (ZHANG Y. Simulation analysis of the temporal and spatial changing trends of Photo-Thermal yields of summer maize in Huang-Huai-Hai area of China[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2013. (in Chinese))
- [22] 陈玉民, 郭国双. 中国主要作物需水量与灌溉[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 1995. (CHEN Y M, GUO G S. Crop water requirement and irrigation of main crops in China[M]. Beijing: China Water & Power Press, 1995. (in Chinese))
- [23] 梁文清. 冬小麦、夏玉米蒸发蒸腾及作物系数的研究[D]. 西安: 西北农林科技大学, 2012. (LIANG W Q. Study on measuring crop evapotranspiration and crop coefficients changes for winter wheat and maize[D]. Xi'an: Northwest A&F University, 2012. (in Chinese))
- [24] 王斌, 孟祥龙, 徐波, 等. 基于文献数据估算中国主要粮食作物水分利用效率[J]. 水利发展研究, 2017(4): 28-33, 43. (WANG B, MENG X L, XU B, et al. Estimation of water use efficiency of main grain crops of China based on literature research[J]. Water Resources Development Research, 2017(4): 28-33, 43. (in Chinese))
- [25] 周雯晶. 中国主要农作物的理论灌溉效率及其节水潜力研究[D]. 郑州: 华北水利水电大学, 2018. (ZHOU W J. Theoretical irrigation efficiency and water saving potential of main crops in China[D]. Zhengzhou: North China University of Water Resources and Electric Power, 2018. (in Chinese))
- [26] ZWART S J, BASTIAANSEN W G M. Review of measured crop water productivity values for irrigated wheat, rice, cotton and maize[J]. Agricultural Water Management, 2004, 69(2): 115-133.

Relative crop water use efficiency and theoretical agricultural water saving potential^{*}

DAI Xiaoping^{1,2}, ZHOU Wenjing³, HAN Yuping^{1,4}, DOU Ming⁵, FENG Ji¹, Svensson Jesper⁶

(1. School of Water Conservancy, North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou 450046, China;

2. Henan Key Laboratory of Water-Saving Agriculture, Zhengzhou 450046, China;

3. Yellow River Engineering Consulting Co., Ltd., Zhengzhou 450003, China;

4. Collaborative Innovation Center of Water Resources Efficient Utilization and Guarantee Engineering, Zhengzhou 450046, China; 5. School of Water Conservancy Science and Engineering,

Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China; 6. Smith School of Enterprise and the

Environment, University of Oxford, Oxford OX13QY, UK)

Abstract: Water use efficiency (WUE) is an important indicator of evaluating irrigation efficiency. However, errors associated with WUE in evaluating irrigation efficiency of regions with different climate have been neglected. Based on the concept of Potential Water Use Efficiency (PWUE) and meteorological data, this study fills this gap by calculating the PWUE of wheat, maize, and rice of China in 2014 as well as evaluating the effect of climate difference on WUE. We put forward and examine concepts and calculation method of Relative Water Use Efficiency (RWUE) and Theoretical Agricultural Water Saving Potential (TAWSP). Our results show that standard deviations of PWUE of main grain crops are between 0.49 and 1.01 kg/m³, and the spatial variance of PWUE of most crops was larger than their actual WUE. The average RWUE of main crops is 50.7% and their TAWSP are between 884.8 and 4 064.5 m³/hm². More importantly, the index of WUE and traditional agricultural water saving potential may overestimate or underestimate the water use efficiency and water saving potential of crops. In addition, we find that the impact of climate difference should not be neglected in comparing WUE in different regions. The indexes of RWUE and TAWSP are more reasonable as they can take into account the regional climate difference.

Key words: relative water use efficiency; theoretical agricultural water saving potential; grain crops

* The study is financially supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 51609082).