

基于蓝绿水核算的稻田水资源利用效用评价

江琦玮, 李玥瑶, 吴梦洋, 操信春
(河海大学 农业科学与工程学院, 江苏 南京 210098)

摘要: 为了科学区分和评价稻田蓝、绿水资源利用效用,开展了每日蓝、绿水交互迁移过程的试验观测,基于作物全生育期蓝、绿水资源迁移机制,建立了蓝、绿水分解方法和用水效率评价指标体系,揭示了不同降水条件下的稻田蓝、绿水利用表现。结果显示:试验期 2015–2018 年稻田水资源收入为 1 322.9 mm(蓝水占 30.7%),其中 572.3、246.0 和 375.2 mm 分别以蒸散发、地表排水和田间渗漏的形式流出。全生育期绿水利用效率(GE)、蓝水利用效率(BE)分别为 0.425、0.490,干旱年的利用效率明显高于湿润年。净蓝水生产率(BP)和绿水生产率(GP)分别为 4.334 与 2.301 kg/m³,后者受降水影响不大。相较于本文的结果,不考虑蓝、绿水迁移过程的传统方法得到的 BE 、 GP 分别高 46.2% 和 29.7%。忽略蓝、绿水交互迁移过程会高估稻田的灌溉效率,同时也会低估降水在作物生长中的贡献。本研究的方法为作物生产水足迹和农田蓝、绿水资源效用评价提供了新路径。

关键词: 农业节水; 蓝绿水; 水资源利用效率; 评价指标; 水稻

中图分类号: S274

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2022)05-0216-09

Water use efficiency evaluation in paddy rice field based on blue and green water accounting

JIANG Qiwei, LI Yueyao, WU Mengyang, CAO Xinchun

(College of Agricultural Science and Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: In order to accurately differentiate and evaluate the efficiency of blue and green water use in paddy rice fields, the blue and green water differentiation model and water use efficiency evaluation index system were established based on the daily experimental observation of blue and green water interaction migration process during the whole crop season. Blue and green water use of paddy fields in Nanjing, China under different precipitation conditions were revealed. Results showed that annual field water inflow in 2015–2018 was measured to be 1,322.9 mm (30.7% blue), 572.3, 246.0, and 375.2 mm of which were discharged in forms of surface drainage, evapotranspiration and leakage. Green (GE) and blue (BE) water efficiency in the whole growth period were calculated as 0.425 and 0.490, respectively, both of which were significantly higher in drought years than in wet years. Net blue (BP) and green (GP) water productivity were 4.334 and 2.301 kg/m³, respectively, and the latter was insignificantly affected by precipitation. BE and GP obtained by conventional method were 46.2% and 29.7% higher than those calculated by the proposed method. Field irrigation efficiency would be overestimated and the contribution of precipitation in crop production would be underrated if the interactive blue and green water migration process was ignored. The method and results of this study can provide a new approach for the evaluation of crop water footprint and agricultural blue and green water use efficiency.

Key words: water saving in agriculture; blue and green water; water use efficiency; evaluation index; paddy rice

收稿日期: 2022-09-03; 修回日期: 2022-09-11

基金项目: 国家自然科学基金项目(51979074); 江苏省自然科学基金项目(BK20221504); 河海大学国家大学生创新训练项目

作者简介: 江琦玮(2000–), 男, 江西婺源人, 本科生, 从事农业水利工程方面的研究。

通讯作者: 操信春(1986–), 男, 江西鄱阳人, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事农业节水理论与方法研究。

1 研究背景

水资源短缺是危及粮食安全和制约经济社会发展的潜在因素^[1]。农业消耗了全球供水总量的70%,农业生产中的水资源高效利用是解决水资源供需矛盾、实现其可持续利用的可靠途径^[2]。农业水资源利用过程及其效用评价也一直是学者们关注的热点问题^[3-4]。

涉及农业生产的水资源包括蓝水和绿水,前者是指从天然水体中取用的灌溉水,后者是指作物生长过程中消耗的降水^[5]。农业用水效率评价中,有关蓝水有效利用及其效用评估的研究受到广泛关注^[6-7]。尽管绿水贡献了全球农业水足迹的60%以上^[8],但在传统的农业用水估算、分配和调节中容易被忽视^[9]。此外,作为自然植被的唯一水源,绿水对整个陆地生态系统的综合治理与生物多样性维护也具有重要影响^[10]。因此,农业水资源利用效用的评价对象由单一蓝水向涵盖绿水在内的广义水资源扩展是重要的发展方向^[11]。自水足迹概念被提出以来,关于不同尺度农作物蓝水和绿水资源消耗量评价的研究不断深入^[12-16],估算有效降水量与假设作物全生育季田间蒸散发中的蓝、绿水比例是当前研究的共同点。与此同时,农业水资源利用表现指标也逐渐由灌溉效率和水生产率转向广义水资源效率及其对水环境的影响^[17-18],从而丰富了水资源利用的评价内涵、扩展了指标的时空尺度,也增加了农业水资源利用效用的维度^[19]。田间尺度上,灌溉效率指标是灌溉技术先进程度的重要度量^[20]。对于雨养农田,可用降水利用率来衡量水资源的有效利用程度,它是指进入田间的降水(绿水)的蒸散量相对于进入田间总降水量的比例^[21]。在此基础上,可使用任一指定区域的广义水系数来评价区域蓝、绿水资源的有效利用程度^[22],增强农业水资源效率评价指标的内涵。农业水资源产出能力指标被称为水分生产力,利用作物产量和水分投入项的比值来计算^[23],水分投入项通常根据研究对象和评价目的进行选择,从而建立不同的水分生产力指标^[24]。在水分投入项中同时考虑蓝水和绿水是水分生产力研究的发展方向。

基于农田蓝、绿水平衡过程分析的水资源效用评估对区域资源环境的可持续性至关重要。然而,若忽略田间的复杂水分运移过程,则难以揭示农田蓝、绿水资源的平衡原理和利用表现^[25],也无法为田间灌溉管理和区域蓝、绿水协同调控提供准确的

信息。基于稻田蓝、绿水迁移过程的试验观测,本文在日时间步长上描述蓝水与绿水的平衡过程,建立基于蓝、绿水分解的田间水资源效用评价指标体系,分析不同降水条件对水资源利用效率指标的影响,以期为农业水文过程和水资源效用评价的研究与实践提供参考。

2 试验与研究方法

2.1 稻田蓝、绿水核算

稻田灌溉排水行为影响着蓝、绿水迁移和消耗过程。当作物未进行播种时,降水(P)是田间水分的唯一来源,水量平衡过程只涉及绿水。在作物生长阶段,由于灌排时间的不确定性,每个水量平衡参数可能包含蓝水和绿水部分。作物收获后田间剩余蓝、绿水以蒸发的形式流出。因此,稻田每日的水量平衡方程为:

$$F_{(t-1)} + P_{(t)} + I_{(t)} = ET_{(t)} + D_{(t)} + L_{(t)} + F_{(t)} \quad (1)$$

式中: $F_{(t)}$ 为日田间水量,mm; $P_{(t)}$ 为日降水量,mm; $I_{(t)}$ 为日灌水量,mm; $ET_{(t)}$ 为日蒸散量,mm; $D_{(t)}$ 为日地表排水量,mm; $L_{(t)}$ 为日渗漏量,mm; t 为当日, $t-1$ 为前一日。

根据每日田间水量中蓝、绿水的比例,分别构建日尺度下蓝水和绿水的水量平衡方程如下^[17]:

$$\begin{cases} F_{(b,t)} = F_{(b,t-1)} + I_{(t)} - (D_{(t)} + ET_{(t)} + L_{(t)}) \cdot \frac{F_{(b,t-1)}}{F_{(t-1)}} \\ F_{(g,t)} = F_{(g,t-1)} + P_{(t)} - (D_{(t)} + ET_{(t)} + L_{(t)}) \cdot \frac{F_{(g,t-1)}}{F_{(t-1)}} \end{cases} \quad (2)$$

式中: $F_{(b,t)}$ 和 $F_{(g,t)}$ 分别为日田间蓝水和绿水的含量,mm。

田间每日各水量平衡要素($ET_{(t)}$ 、 $L_{(t)}$ 、 $D_{(t)}$)中来自蓝水和绿水的部分均通过前一天结束时田间水层中蓝、绿水的比例进行计算。这里需要特别说明的是,稻田地表排水的形成不同于旱作物地表径流,它的发生是由灌溉制度决定的,因此也按照上述方法进行计算。如,稻田蓝、绿水蒸散量的计算如下:

$$\begin{cases} ET_{(b,t)} = ET_{(t)} \cdot \frac{F_{(b,t-1)}}{F_{(t-1)}} \\ ET_{(g,t)} = ET_{(t)} \cdot \frac{F_{(g,t-1)}}{F_{(t-1)}} \end{cases} \quad (3)$$

式中: $ET_{(b,t)}$ 和 $ET_{(g,t)}$ 分别为日蒸散量中来自蓝水和绿水的部分,mm。

田间初始蓝、绿水比例可以在田间尺度测量,也可以在区域尺度进行定义,与蓝、绿水划分模型相结

合,为农业用水效率评价提供基础。

2.2 水资源利用效率评价指标

蓝水效率(BE)、绿水效率(GE)、水资源效率(WE)是衡量田间水资源有效利用程度的指标。定义为蒸散量与对应水资源投入量的比值。计算式分别为:

$$BE = \frac{ET_b}{I} \quad (4)$$

$$GE = \frac{ET_g}{P + F_0} \quad (5)$$

$$WE = \frac{ET}{I + P + F_0} \quad (6)$$

$$\begin{cases} ET_b = \sum_{t=1}^T ET_{(b,t)} \\ ET_g = \sum_{t=1}^T ET_{(g,t)} \end{cases} \quad (7)$$

式中: ET_b 、 ET_g 、 ET 分别为蓝水、绿水蒸散量及总蒸散量,mm; F_0 为初始田间水量,mm; T 为核算时段总天数。

选取净、毛水分生产率指标来评价水资源的产出能力。净水分生产率指标定义为单位水资源蒸散量的粮食产量(Y ,单位:kg/hm²),包括净蓝水生产

率(BP)、净绿水生产率(GP)和净水分生产率(WP),计算式分别为:

$$BP = \frac{Y}{10ET_b} \quad (8)$$

$$GP = \frac{Y}{10ET_g} \quad (9)$$

$$WP = \frac{Y}{10ET} \quad (10)$$

毛水分生产率指标为单位水资源总投入量的粮食产量,包括毛蓝水生产率(BP_{gross})、毛绿水生产率(GP_{gross})、毛水分生产率(WP_{gross}),计算方法与上述一致。

2.3 试验布设与观测

试验于2015–2018年在江苏省南京市河海大学节水园区内(31°57'N,118°50'E)进行。该区域年均气温为17.5℃,年均降水量为1051mm,年均蒸发量为900mm,无霜期约220d。表1收集了2015–2018年水稻各生育期降水量和降水持续天数。试验区土壤类型为黏壤土,干容重为1.31g/cm³,土壤饱和和质量含水率为38.2%,有机质含量为2.40%,pH值为8.10。灌排方式为浅水勤灌,各生育期田间水分控制参数见表2。

表1 2015–2018年水稻分生育期天数及降水量

年份	指标	作物生育期						合计
		返青期	分蘖期	拔节孕穗期	抽穗开花期	乳熟期	黄熟期	
2015	天数/d	11	40	20	20	23	22	136
	降水量/mm	70.6	513.3	180.5	43.0	54.7	9.4	871.5
2016	天数/d	10	32	22	15	20	25	124
	降水量/mm	287.5	301.4	18.5	3.1	150.5	243.9	1004.9
2017	天数/d	10	32	22	15	20	27	126
	降水量/mm	0.5	109.0	205.0	85.0	94.0	111.5	605.0
2018	天数/d	10	35	17	19	18	18	117
	降水量/mm	162.4	55.4	202.8	72.7	9.0	30.1	532.4

表2 试验水稻各生育期稻田水分控制标准

灌溉控制指标	返青期	分蘖期	拔节孕穗期	抽穗开花期	乳熟期	黄熟期
灌水上限/mm	30	30	50	40	40	0
灌水下限/mm	10	(10%~60%) θ_s	10	10	10	(60%~70%) θ_s
蓄雨上限/mm	40	100	150	200	200	0

注:表中单位为mm的数据为田面水深; θ_s 为土壤的饱和含水率;百分比数据为表层30cm土壤的含水率占土壤饱和含水率的百分比。

水稻于6月下旬移栽,10月下旬收获。整个水稻生育期分为6个阶段:返青期、分蘖期、拔节孕穗

期、抽穗开花期、乳熟期和黄熟期。试验设3个重复,各试验小区面积一致,所采取的农技措施与当地

一致。水稻种植在长 0.90 m、宽 0.68 m、深 0.67 m 的微型蒸渗仪中,试验小区布置见图 1。

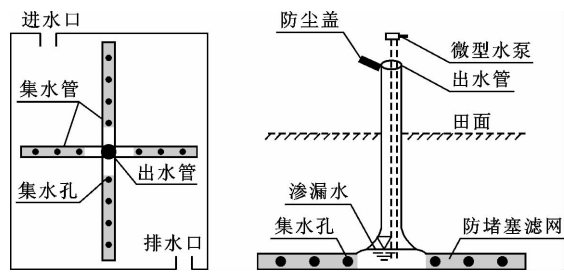


图 1 试验小区布置图

通过试验观察获取每日的气象、土壤水分、灌排和产量等数据。日降水量($P_{(t)}$)用安装在试验地点的雨量计记录。每天上午 08:00 时,用钢尺测量田间水层。当田面没有水层时,用 TDR 探头监测土壤水分含量,在测桶中心处 0~30 cm 的土壤中预埋一组 TDR 探头。根据水分控制标准(表 2)确定每次的灌水量(I)和地表排水量(D),并进行详细记录。每 3 d 用桶底埋置的三通管来获取渗漏量(图 1)。三通管中的水面线要始终保持在桶内土面以下约 30 cm 处。在作物生育期结束后人工收割作物,并用手推式脱粒机进行脱粒,待水稻自然晒干后测定该测桶内的水稻实际产量。

3 结果与分析

3.1 稻田蓝、绿水平衡与耗用过程

2015–2018 年稻田年均的水资源流入总量为 1 322.9 mm,其中田间已有水量(F_0)占 12.3%,降水量(P)占 57.0%,灌水量(I)占 30.7%。地表排水量(D)、蒸散量(ET)、渗漏量(L)的年均值分别为 572.3、246.0 和 375.2 mm。蓝、绿水迁移过程受降水及其在作物季节分布的影响。各年份作物生育期每日的蓝、绿水资源收支动态平衡过程如图 2 所示。

由图 2 可以看出,各水量平衡参数随时间变化的趋势存在年际差异。2015–2016 年降水量分配不均,降水量在分蘖期比较集中,而拔节孕穗期和抽穗开花期比较依赖灌溉。2017–2018 年降水量较前两年平均减少了 33.5%,视作干旱年,但降水在整个生育期的分配相对均匀,降水量的峰值均出现在拔节孕穗期并且未超过 120 mm。地表排水通常由降水量及其发生频率直接引起。2015 和 2016 年的地表排水分别发生了 6 次和 10 次,而在后两年只发生了 3 次和 2 次。2015、2017 和 2018 年所有排水

事件均包含了蓝水和绿水。而因灌溉需求滞后,2016 年蓝水地表排水只出现在最后一个生育阶段。2015 年各生育阶段均发生了灌溉。2016 年水稻在前两个生育阶段不需要灌溉。2017 年分蘖期和拔节孕穗期比较依赖灌溉,该阶段灌水量占全生育期的 58.7%,蓝水消耗量也高于其他生育期。2018 年拔节孕穗期和乳熟期灌水量较为集中,蓝水的消耗也相对较高。生育期内降水的分配影响到了稻田蓝水和绿水资源的迁移过程。2015 年作物全生育期降水共发生了 42 次,其中分蘖期降水量占全生育期的 50% 以上,呈现明显的聚集特征。分蘖期一共进行了 3 次排水,累计排水量高于其他生育阶段,其中绿水排水量的占比最高。分蘖期和拔节孕穗期是绿水消耗的主要阶段,绿水的蒸散量(ET_g)与渗漏量(L_g)占全生育期的 60% 以上。2015 年全生育期灌水次数为 12 次,在拔节孕穗期、抽穗开花期、乳熟期较为频繁。其中乳熟期的蓝水消耗量最高,该阶段蓝水蒸散量(ET_b)及其渗漏量(L_b)占全生育期的 30% 以上。2016 年全生育期降水量较 2015 年增加了 15.3%,但降水次数减少,生育前期和末期频繁发生较大降水,这也增加了蓝水的迁移量和频率。

2015–2018 年,整个作物生育期内田间蓝、绿水平衡参数也呈现出年际变化特征,如表 3 所示。

表 3 2015–2018 年试验稻田全生育期水分收支指标 mm

指标	2015 年	2016 年	2017 年	2018 年	均值
F_0	163.7	163.2	163.4	163.8	163.5
水分 P	871.5	1004.9	605.0	532.4	753.5
收入 I	425.3	374.9	410.6	412.9	405.9
合计	1460.5	1543.0	1179.0	1109.1	1322.9
D_g	243.9	454.5	75.7	61.5	208.9
D D_b	47.7	51.6	37.6	11.4	37.1
D	291.6	506.1	113.3	72.9	246.0
ET_g	432.0	348.9	348.0	366.8	373.9
ET ET_b	181.3	198.3	214.4	199.5	198.4
ET	613.3	547.2	562.4	566.3	572.3
L_g	319.1	237.6	238.4	218.3	253.4
L L_b	125.9	106.8	138.0	116.6	121.8
L	445.0	344.4	376.4	334.9	375.2
FT_g	44.4	131.5	108.5	52.1	84.1
F_T FT_b	66.1	13.8	19.1	82.8	45.5
F_T	110.5	145.3	127.6	134.9	129.6

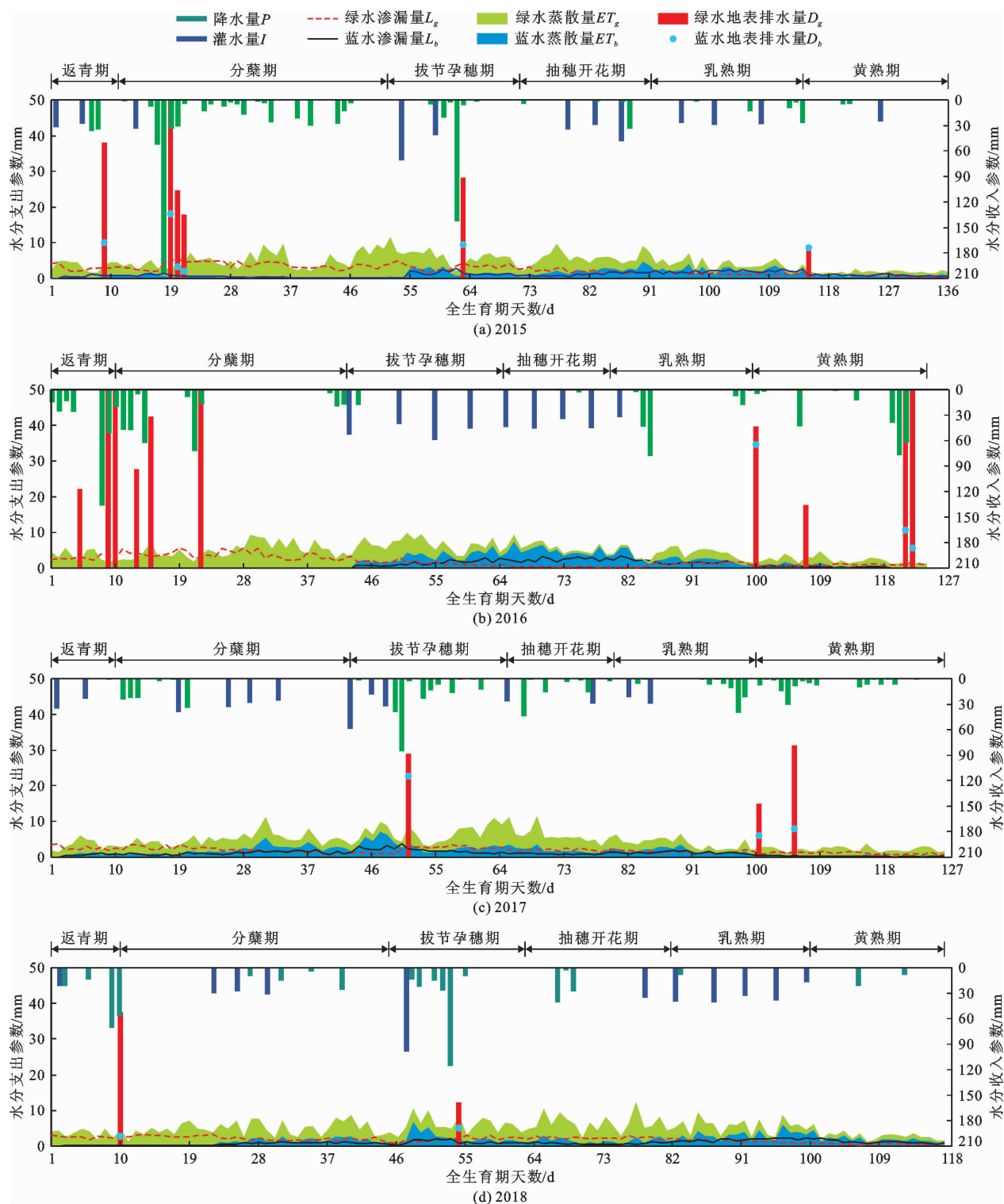


图2 2015—2018年试验稻田蓝、绿水收支参数逐日变化图

本研究中初始土壤含水量 (F_0) 全部来自播种前的降水,因此,表3中的 F_0 和降水量 (P) 统一归为绿水投入量,灌水量 (I) 为稻田的蓝水投入量。试验期水资源总流入量为 1 322.9 mm,其中蓝水占 30.7%,绿水占 69.3%。各年份总水资源投入量及其组成存在差异,湿润年(2015—2016年)绿水投入

量平均为 1 101.6 mm,比干旱年(2017—2018年)高出 50.4%。各年份灌水量 (I) 的变化范围为 374.9~425.3 mm,年际差异小于绿水投入量。此外 2015—2018 年田间耗水量 ($ET + L$) 的变化范围为 891.6~1 058.3 mm,其中绿水的消耗量超过了 60%。田间蒸散量 (ET) 的年均值为 572.3 mm,是

试验稻田中最主要的水分消耗形式。 ET 代表实际用于作物生长的有效消耗量,对于衡量田间水分的有效利用程度至关重要。即便如此,投入的水资源以蒸散发消耗的比例也不超过 50%。地表排水量(D)和渗漏量(L)年均值分别达到 246.0 和 375.2 mm。 L 是由土壤特性决定的不可避免的田间耗水,而 D 可以通过人为干预而减少。绿水在所有的水量支出参数中均占主导地位,其构成也存在年际差异。2016 年的 D_g 超过了 450 mm,明显高于其他年份。 D_g 在湿润年占水资源总投入量的 30% 以上,而在干旱年(2017–2018 年)低于 10%,这表明绿水投入量的增加可能导致绿水利用量和效率的下降。湿润年绿水的消耗量为 668.8 mm,其中 ET_g 的占比低于干旱年,尤其是 2015 年。干旱年蓝水的消耗量为 334.3 mm,其中 ET_b 的占比与湿润年差异不明显。这意味着蓝水的有效利用程度可能受降水分布特征的影响更大。通过追踪全生育期蓝、绿水资源的迁移过程,可进行各生育阶段的蓝、绿水资源支出去向的区分,从而为水资源的效用分析提供数据基础。

3.2 蓝、绿水利用效率

图 3 给出了 2015–2018 年水稻全生育期的绿水利用效率(GE)、蓝水利用效率(BE)及水资源利用效率(WE)及各年份降水量。

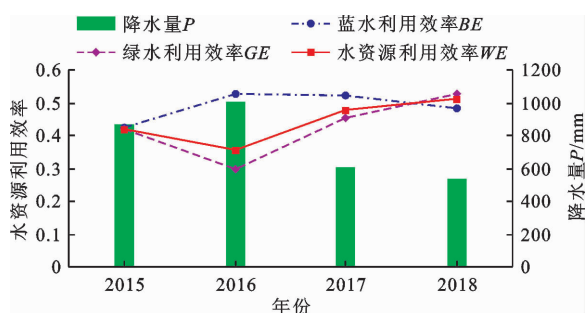


图3 2015–2018年试验水稻全生育期水资源利用效率及降水量

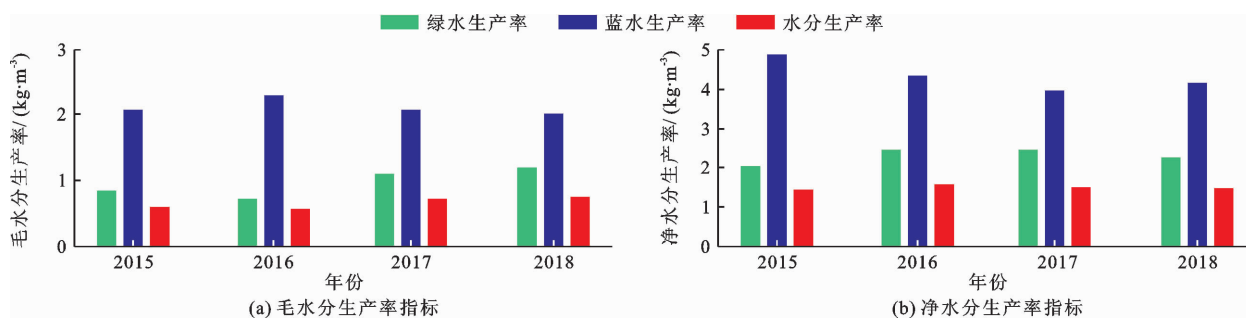


图4 2015–2018年试验稻田的水资源生产力指标对比

图4显示,蓝水产出能力高于绿水和广义水资源。由于2015–2018年作物单产量的年际差异不

分析图3可知,2015–2018年全生育期 GE 、 BE 及 WE 的年均值分别为0.425、0.490和0.440,总体上,绿水的有效利用率低于蓝水。 GE 和 WE 与 P 呈负相关。干旱年的水资源(尤其是绿水)有效利用程度高于湿润年,具体而言,干旱年 P 较湿润年平均减少了33.5%, GE 平均增大了26.5%。2016年 GE 为0.299,在所有年份中最低,仅为2018年(最高值)的56.7%。生育期 P 较大或频次较高都可能导致绿水随地表排水的损失而增加,从而降低绿水的有效利用率。2015–2018年 WE 的变化范围为0.355~0.511,随着 P 的减少,干旱年 WE 平均增加了27.5%,在以降水为主要农业水源的地区,绿水往往是影响 WE 的主要因素,因此,减少地表排水量有利于在水稻生产中充分利用广义水资源。 BE 的年际差异小于 WE 和 GE 的年际差异,而且 BE 与降水量没有明显的相关关系。2015年 BE 为0.426,低于其他年份,2016和2017年 BE 超过了0.520,2018年下降到0.483。尽管2015年 P 接近900 mm,但由于生育期内 P 分布不均,需要大量的 I 来满足作物需水(表3),而 I 的有效利用率较低,特别是在分蘖期和拔节孕穗期。在分蘖前期,由于没有提前预测到第7 d会发生较大降水,在进入分蘖期的第3 d还进行了一次不必要的灌水(图2(a)),导致几乎均以 D_b 形式流出田间,因此,田间灌溉效率不仅取决于土壤和作物的需水量,还受蓝水和绿水资源流入时间和数量的影响。

2015–2018年试验稻田的水稻单产量分别为8 803.4、8 599.1、8 491.7和8 287.4 kg/hm^2 。由此可以计算出各年份的水分生产率指标。

图4展示了2015–2018年试验稻田的蓝水、绿水以及广义水资源的毛水分生产率和净水分生产率指标对比。

超过6%,远小于水资源投入量及有效消耗量的年际差异,因此水分生产率指标整体与相应的水资源

投入或者消耗量呈负相关。

由图 4(a) 可知, 2015–2018 年毛绿水生产率 (GP_{gross}) 的年均值为 0.970 kg/m^3 。2016 年为 0.736 kg/m^3 , 比其他年份低约 7% ~ 38%。毛蓝水生产率 (BP_{gross}) 的年均值为 2.113 kg/m^3 , 超过 GP_{gross} 的 2 倍。由于 I 与 P 几乎是此消彼长, 因此 2016 年 BP_{gross} 最大, 为 2.302 kg/m^3 。包括蓝水和绿水的毛水分生产率 (WP_{gross}) 的年均值为 0.657 kg/m^3 。绿水是水资源投入量的主要组成部分, 所以 WP_{gross} 整体与 GP_{gross} 呈现相同的年际变化规律。综合来看, 除了 BP_{gross} 年际差异相对较小, 干旱年毛水分生产率指标高出湿润年 30%。净水分生产率反映的是单位水资源有效利用量的产出能力, 整体比毛生产率指标高出近 2 倍, 如图 4(b) 所示。2015–2018 年净绿水生产率 (GP) 的年均值为 2.301 kg/m^3 , 湿润年与干

旱年的平均差异不超过 5%, 主要是由于湿润年平均 30% 的 P 通过地表排水损失致使其 ET_g 与干旱年的差异微小。2015–2018 年净蓝水生产率 (BP) 的年均值为 4.334 kg/m^3 , 干旱年平均低于湿润年 12%, 主要是由于干旱年的 ET_b 超出湿润年的 9.0%, 而产量又低于湿润年的 3.6% 而引起。因此, 需要提高作物产量, 以提高农业生产效率和 BE , 特别是干旱年。净水分生产率 (WP) 的年均值为 1.496 kg/m^3 , 年际差异明显小于 BP 和 GP , 表明低耗水的优势可能被作物的低产量抵消。

上述水资源效用指标的比较结果表明, 水资源投入量对每个具体的用水效率评价指标均有影响。在此基础上, 分析了水资源总投入量与蓝、绿水效用指标的相关性, 如图 5 所示, 以进一步阐明两者之间的关系。

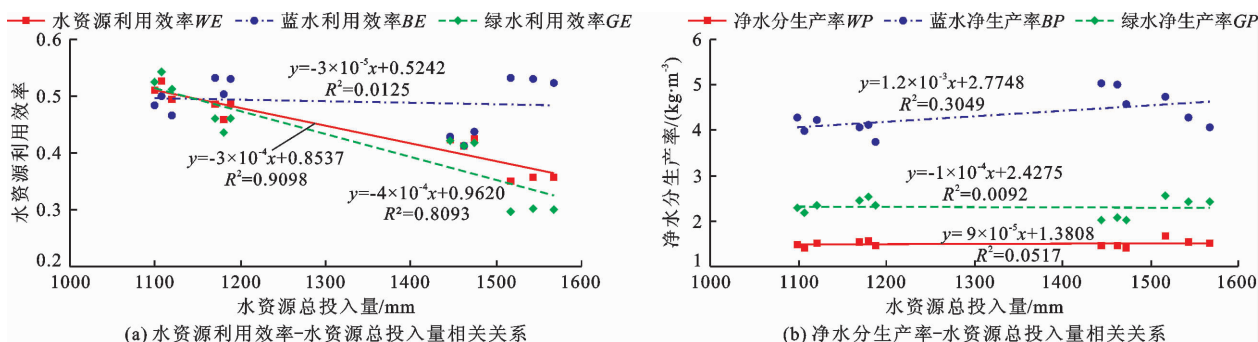


图 5 2015–2018 年试验稻田用水效用与水资源总投入量的相关关系

由图 5(a) 可以看出, BE 与水资源总投入量无显著相关关系, 而 WE 、 GE 与水资源总投入量之间呈负相关关系, 两者与水资源总投入量的拟合系数分别达到 0.909 8 和 0.809 3, 表明水资源投入量对绿水和总水分的有效利用程度影响较大。作物需水量主要由作物特性和气象条件决定, 在不同年份基本保持稳定, 因此 WE 随着水资源总投入量的增大而减小; 降水贡献了大部分的水资源投入量 (表 3), 因此, 绿水的有效利用程度随着水资源投入量的增加而明显减小, 与水资源投入数量相比, 灌溉行为对 BE 有更大影响。由图 5(b) 可以看出, BP 与水资源总投入量呈显著正相关关系, 拟合系数为 0.304 9, 而 WP 和 GP 与水资源总投入量无明显关系。可见在基于蓝、绿水分解的农业用水评价体系中, 水资源的消耗和利用过程变得更加复杂。

4 讨论

本文将绿水纳入农业水资源效用评价体系之中, 意味着该方法不仅适用于灌溉农田, 还可以对雨

养农田的水资源效用进行评价。然而如何分别量化农业用水中的蓝水和绿水资源是现代水资源评估的难点。在此之前, 未进入土壤的水资源所产生的地表径流或排水一律被认为来自降水, 人们只关心如何区分进入土壤的水资源中的蓝水和绿水。在已有的研究中, 认可度较高的田间尺度下蓝、绿水量化方法是根据生育期内蓝水和绿水的投入比例来粗略估算田间水分消耗过程中蓝、绿水各自的部分^[25]。事实上蓝水和绿水的迁移过程十分复杂, 这种量化方法忽略了蓝水和绿水在作物生育进程中所展现出的动态平衡过程。

基于蓝、绿水分解的农田水资源利用评估方法弥补了上述缺陷, 该方法考虑到了水稻生育期水分迁移的完整过程, 追踪了这一完整过程中蓝水和绿水各自的迁移路径。对水稻生育期内蓝、绿水的科学区分使得改进后的水资源效用指标更具有参考价值。在传统方法中, 认为所有的地表排水均来自于降水 (绿水), 此外, 其他水量平衡参数中的蓝、绿水组成由整个作物生育期进入田间的灌溉水与降水比

例决定。蒸散量 ET 为田间水平衡和农业用水效率评估的核心指标,因此,将本文研究方法与传统计算方法得到的 ET 列于表 4 进行对比。

表 4 2015 – 2018 年试验稻田本文研究方法与传统计算方法下的蒸散量 ET 比对

年份	传统计算方法			本文方法
	ET_b /mm	ET_g /mm	ET_b 占比/%	ET_b 占比/%
2015	295.7	317.7	48.2	29.6
2016	291.3	255.9	53.2	36.2
2017	279.6	282.7	49.8	38.1
2018	288.2	278.1	50.9	35.2
平均值	288.7	283.6	50.5	34.8

由表 4 中的传统方法计算结果来看, ET_b 和 ET_g 年均值分别为 288.7 和 283.6 mm,与本文研究

方法得出的 ET_b 和 ET_g (表 3) 相差较大,其中表 4 中的 ET_b 年均值比表 3 中相应值大 45.5%。另外,传统方法下试验期各年份 ET_b 的变化幅度为 16.1 mm (279.6 ~ 295.7 mm),远小于本研究方法得到的 ET_b 变化幅度 33.1 mm (181.3 ~ 214.4 mm), ET_g 的占比与 ET_b 呈现相似的情况。由于 ET_b 年际变化较小,传统方法中 ET_b 平均占比为 50.5%,远高于本研究计算结果 34.8%。显然,如果不考虑田间蓝、绿水的动态迁移过程,灌溉水的作用可能被高估,而降水的贡献则被低估,并且蓝、绿水组成的年际差异可能被掩盖,蓝、绿水核算结果的差异直接导致了用水效率评价的偏差。为了全面揭示水资源消耗和利用的表现,将本文研究方法与传统方法得出的水资源效率评价指标进行比较,如图 6 所示。

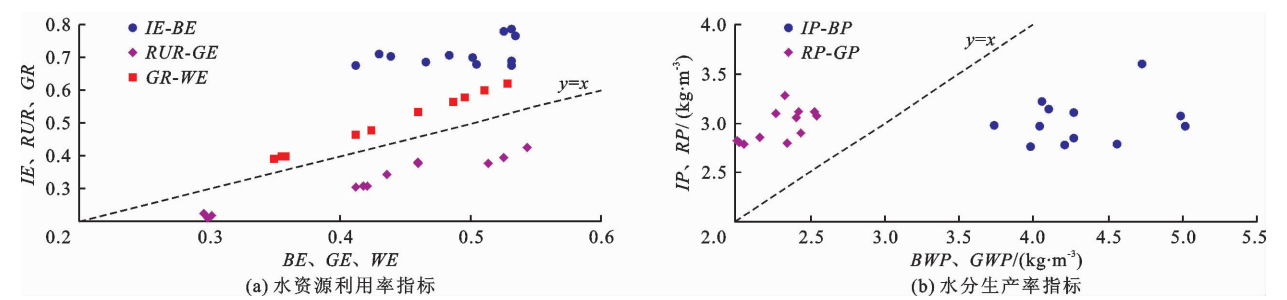


图 6 本文研究方法与传统方法得出的水资源效用评价指标对比

图 6(a) 中 IE 、 RUR 、 GR 分别为传统方法下得到的灌溉效率、降水利用率和广义水利用率,用来衡量传统视角下蓝水(灌溉水)、绿水(降水)和总水资源(蓝水 + 绿水)的有效利用程度。可以看出,两种途径得到的有效利用程度指标中, IE 明显高于 BE , 其变化范围在 0.674 ~ 0.785 之间,比 BE 高 46.2% (2015 和 2016 年为 55.0%),说明传统方式下蓝水的有效利用程度被高估的可能性较大,尤其是在湿润年。相反, GE 均略低于 RUR ,这使得 WE 也小于 GR 。此外, $RUR - GE$ 和 $GR - WE$ 存在明显的线性关系,而 $IE - BE$ 则没有。可见采用不同的方法得出的灌溉水有效利用率相差较大,这也证明了进行蓝水和绿水科学区分的重要性。图 6(b) 对比了两种方法下的水资源产出能力指标,从中可以看出两种方法下的水分生产率指标存在明显差异。以传统方法获得的灌溉水生产率(IP) 平均比本文研究方法得出的 BP 低 30%,雨水生产率(RP) 与 GP 之间的情况则相反。由于缺乏水文学原理,传统方法往往低估了蓝水的产出能力,高估了绿水的产出能力,不能准确揭示田间水资源利用的真实情况。本文提出的蓝、绿水核算框架是科学、准确评价稻田水资源利用

状况的有效手段,该方法可以用来评估其他作物或水文模型的区域蓝、绿水通量和作物水足迹。此外,本文对蓝、绿水利用效用的研究结果,如蓝、绿水利用效率特征的差异,可以为田间水资源的效用评价和管理提供新的启示。相较于水资源量,水资源的核算过程对水资源利用表现有更为明显的影响,特别是对蓝水。这不仅为灌溉管理提供了新的信息,也进一步说明了对蓝、绿水划分进行研究的重要性。

5 结 论

- (1) 试验期 2015 – 2018 年稻田来自降水和灌溉的水资源年均投入量分别为 917.0 和 405.9 mm,绿水在所有水资源流出参数中占主导地位。降水投入量及其分布特征对稻田水资源的迁移及利用产生了重要影响,湿润年的总水资源投入量、地表排水量和渗漏量均高于干旱年,过多的降水不能增强蓝水的高效利用。
- (2) 蓝水和绿水的利用效率指标在干旱年和湿润年之间存在较大差异。绿水利用效率指标与降水关系密切,而蓝水利用效率也受水资源(降水或灌溉水)投入时间的影响。与本文研究结果相比,传

统方法得到的 *BE* 和 *GP* 分别平均偏高 46.2% 和 29.7%, 传统方法容易高估蓝水的有效利用程度、低估蓝水的产出能力同时低估降水在作物生长过程中的贡献。

(3) 本研究建立的稻田蓝、绿水核算框架及水资源效用评价体系不仅拓展了原有评价体系的适用范围, 还增强了农业水资源效用评价的科学性与准确性。可为基于水足迹的农业水管理研究与实践提供支撑。本文是基于田间尺度展开研究, 未来可以考虑空间尺度变化带来的影响, 以促进区域水资源的可持续利用。

参考文献:

- [1] 刘晶, 鲍振鑫, 刘翠善, 等. 近 20 年中国水资源及用水量变化规律与成因分析[J]. 水利水运工程学报, 2019(4): 31–41.
- [2] KISAKYE V, BRUGGEN B V D. Effects of climate change on water savings and water security from rainwater harvesting systems[J]. Resources, Conservation and Recycling 2018, 138: 49–63.
- [3] CAO Xinchun, ZENG Wen, WU Mengyang, et al. Water resources efficiency assessment in crop production from the perspective of water footprint[J]. Journal of Cleaner Production 2021, 309: 127371.
- [4] 金巍, 刘双双, 张可, 等. 农业生产效率对农业用水量的影响[J]. 自然资源学报, 2018, 33(8): 1326–1339.
- [5] 杨肖丽, 李文婷, 任立良, 等. 渭河流域蓝绿水对土地利用变化的响应模拟[J]. 农业工程学报, 2021, 37(11): 268–276.
- [6] 高洁, 吴普特, 谢朋轩, 等. 灌区蓝绿水资源与作物生产水足迹多时空分布量化分析[J]. 农业工程学报, 2021, 37(5): 105–112.
- [7] HUANG Zhongwei, HEJAZI M, TANG QiuHong, et al. Global agricultural green and blue water consumption under future climate and land use changes[J]. Journal of Hydrology, 2019, 574: 242–256.
- [8] 马育军, 李小雁, 徐霖, 等. 基于蓝绿水细分的北京市虚拟水战略研究——以粮食作物为例[C]// 中国地理学会. 中国地理学会百年庆典学术论文摘要集, 2009.
- [9] ZOU Yufeng, SADDIQUE Q, ALI A, et al. Deficit irrigation improves maize yield and water use efficiency in a semi-arid environment[J]. Agricultural Water Management, 2021, 243: 106483.
- [10] 张杰, 贾绍凤. 基于 SWAT 模型的湟水流域蓝绿水与不同土地利用类型的绿水差异研究[J]. 水资源与水工程学报, 2013, 24(4): 6–10.
- [11] GENG Qingling, REN Qingfu, NOLAN R H, et al. Assessing China's agricultural water use efficiency in a green – blue water perspective: A study based on data envelopment analysis[J]. Ecological Indicators, 2019, 96 (Part 1): 329–335.
- [12] 操信春, 任杰, 吴梦洋, 等. 基于水足迹的中国农业用水效果评价[J]. 农业工程学报, 2018, 34(5): 1–8.
- [13] 单纯宇, 王素芬. 海河流域作物水足迹研究[J]. 灌溉排水学报, 2016, 35(5): 50–55.
- [14] WU Mengyang, LI Yueyao, XIAO Jianfeng, et al. Blue, green, and grey water footprints assessment for paddy irrigation – drainage system[J]. Journal of Environmental Management, 2022, 302(Part B): 114116.
- [15] 马驰, 杨中文, 宋进喜, 等. 1992–2017 年中亚五国农作物水足迹变化特征[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2021, 29(2): 269–279.
- [16] CAO Xinchun, WU Mengyang, SHU Rui, et al. Water footprint assessment for crop production based on field measurements: A case study of irrigated paddy rice in East China[J]. Science of the Total Environment, 2018, 610–611: 84–93.
- [17] 操信春, 崔思梦, 吴梦洋, 等. 水足迹框架下稻田水资源利用效率综合评价[J]. 水利学报, 2020, 51(10): 1189–1198.
- [18] 惠婷, 陈晓楠, 宋健峰. 基于水足迹的作物生产生态效率评价——以陕西省为例[J]. 生态学报, 2021, 41(8): 3078–3091.
- [19] CAO Xinchun, ZENG Wen, WU Mengyang, et al. Hybrid analytical framework for regional agricultural water resource utilization and efficiency evaluation[J]. Agricultural Water Management, 2020, 231: 106027.
- [20] BERBEL J, GUTIERREZ – MARTIN C, EXPOSITO A. Impacts of irrigation efficiency improvement on water use, water consumption and response to water price at field level[J]. Agricultural Water Management, 2018, 203: 423–429.
- [21] HUANG Xuan, FANG Huan, WU Mengyang, et al. Assessment of the regional agricultural water – land Nexus in China: A green – blue water perspective[J]. Science of the Total Environment, 2022, 804: 150192.
- [22] 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.
- [23] 张灿灿, 孙才志. 基于 CiteSpace 的水足迹文献计量分析[J]. 生态学报, 2018, 38(11): 4064–4076.
- [24] 操信春, 刘喆, 吴梦洋, 等. 水足迹分析中国耕地水资源短缺时空格局及驱动机制[J]. 农业工程学报, 2019, 35(18): 94–100.
- [25] HOEKSTRA A Y. Green – blue water accounting in a soil water balance[J]. Advances in Water Resources, 2019, 129: 112–117.