ICS 编号
CCS 编号

团 体 标 准

T/CHES XXX—20XX

水稻水足迹核算与评价技术规范

Technical specification for crop water footprint calculation and evaluation in paddy filed

（报批稿）

请将你们发现的有关专利的内容和支持性文件随意见一并返回

20XX-XX-XX 发布　　20XX-XX-XX 实施

中国水利学会　发 布

目　　次

前　　言 ……II
1 范围 ……1
2 规范性引用文件 ……1
3 术语和定义 ……1
4 符号和缩略语 ……2
5 资料准备 ……3
5.1 基本规定 ……3
5.2 田块尺度 ……3
5.3 灌区尺度 ……4
5.4 区域尺度 ……4
6 田块尺度水稻水足迹计算 ……5
6.1 基本步骤 ……5
6.2 计算方法 ……5
7 灌区尺度水稻水足迹计算 ……7
7.1 基本步骤 ……7
7.2 计算方法 ……7
8 区域尺度水稻水足迹计算 ……8
8.1 基本步骤 ……8
8.2 计算方法 ……8
9 水稻水足迹分析评价 ……9
9.1 基本规定 ……9
9.2 综合用水效率评价 ……9
9.3 灌区节水效果评价 ……10
9.4 水稻水足迹可持续性评价 ……11
9.5 水稻水足迹核算与评价报告 ……13
附录 A（资料性）作物需水量的计算方法 ……14
附录 B（资料性）有效降水量的计算方法 ……15

前　　言

本文件按照 GB/T 1.1—2020《标准化工作导则　第 1 部分：标准化文件的结构和起草规则》的规定起草。

本文件共分为 9 章和 2 个附录，主要技术内容包括范围、术语、不同尺度水稻水足迹核算方法、水稻水足迹分析评价等。

请注意本文件的某些内容可能涉及专利。本文件的发布机构不承担识别专利的责任。

本文件由中国水利学会归口。执行过程中如有意见或建议，请寄送至中国水利学会（地址：北京市西城区白广路二条 16 号，邮编 100053），以便今后修订时参考。

本文件主编单位：河海大学、西北农林科技大学。

本文件参编单位：华中科技大学、中国水利水电科学研究院、江苏省水资源服务中心、涟水县水利局。

本文件主要起草人：操信春、吴普特、吴梦洋、李玥瑶、严冬、卓拉、高学睿、孙世坤、刘静、王玉宝、何国华、汪勇、王菊、孙怀卫、韦诚、汤树海。

水稻水足迹核算与评价技术规范

1 范围

本文件规定了田块、灌区及区域尺度水稻水足迹核算与评价方法。
本文件适用于田块、灌区及区域尺度水稻水足迹核算与评价工作。

2 规范性引用文件

下列文件中的内容通过文中的规范性引用而构成本文件必不可少的条款。其中，注日期的引用文件，仅该日期对应的版本适用于本文件；不注日期的引用文件，其最新版本(包括所有的修改单)适用于本文件。

GB 3838 地表水环境质量标准

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件

3.1

水稻水足迹 rice water footprint

水稻生育期内田间消耗和稀释污染物所需的总水量（mm 或 m^3），分为蓝水足迹、绿水足迹和灰水足迹。

3.2

水稻蓝水足迹 rice blue water footprint

水稻生育期内以蒸散发形式消耗的地表水或地下水量（mm 或 m^3）。

注：消耗是指流域内可利用的地表水和地下水的损失。

3.3

水稻绿水足迹 rice green water footprint

水稻生育期内以蒸散发形式消耗的降水量（mm 或 m^3）。

注：绿水足迹与农林产品密切相关（作物产品、林木产品或畜牧业产品），这些产品的绿水足迹指雨水总蒸散量（来自田地或植被），加上储存在作物或林木内的水。

3.4

水稻灰水足迹 rice grey water footprint

水稻生育期内，为稀释作物生产过程中释放的污染物，使污染物负荷达到环境标准所需要的水量（mm 或 m^3）。

3.5

水稻生产水足迹 rice water footprint for production

水稻生育期内生产单位作物产品所消耗的水量（m^3/kg）。可以根据水足迹类别，分为蓝水生产水足迹、绿水生产水足迹、灰水生产水足迹。

3.6

自然本底浓度 natural concentration

自然条件、无人为影响下水体中特定污染物的平均浓度（mg/L）。

3.7

有效降水量 effective precipitation

作物生育期进入农田或土壤、能够以蒸散发形式消耗的降水量（mm），常以水层深度表示。

3.8

化肥淋溶率 leaching rate of fertilizer

进入水体的污染量占总化肥施用量的比例。

3.9

水分生产力 water productivity

单位水资源量所获得的作物产量（kg/m^3）。

3.10

水资源压力 water resources stress

水资源利用所面临的压力，常用区域可利用水资源量满足其水资源需求的程度来表示。

3.11

田块尺度 field scale

由田间末级固定的沟、渠、路、田坎等围成的满足农业作业需求的基本耕作单元。

3.12

灌区尺度 irrigation district scale

具备完整的输水、配水、灌水和排水工程系统，能按农作物的需求并考虑水资源和环境承载能力，提供灌溉排水服务的区域空间范围。

3.13

区域尺度 regional scale

根据自然地理特征划分出的地球表面的地域或流域单元。

注：本文件适用的区域尺度特指国家尺度以内超出灌区尺度的行政单元，如省、市、乡、县或者水文单元如流域都算作区域尺度。

4 符号和缩略语

下列符号和缩略语适用于本文件。

AWU 农业用水量（Agricultural Water Use）
BWA 可用蓝水资源量（Blue Water Availability）
BWE 蓝水效率（Blue Water Efficiency）
BWI 蓝水投入量（Blue Water Input）
BWP 蓝水生产力（Blue Water Productivity）
BWS 蓝水资源压力（Blue Water Resources Stress）
GWA 可用绿水资源量（Green Water Availability）
GWE 绿水效率（Green Water Efficiency）
GWI 绿水投入量（Green Water Input）
GWP 绿水生产力（Green Water Productivity）
GWS 绿水资源压力（Green Water Resources Stress）
PRO_{blue} 蓝水足迹占比（Proportion of Blue Water Footprint）
PRO_{con} 消耗性水足迹占比（Proportion of Consumptive Water Footprint）
RWF 水稻水足迹（Rice Water Footprint）
RWF_{blue} 水稻蓝水足迹（Blue Water Footprint of Rice）

RWF_{green} 水稻绿水足迹（Green Water Footprint of Rice）
RWF_{grey} 水稻灰水足迹（Grey Water Footprint of Rice）
RWFP 水稻生产水足迹（Rice Water Footprint for Production）
TWA 总可用水资源量（Total Water Availability）
TWE 总水资源效率（Total Water Efficiency）
TWP 总水资源生产力（Total Water Productivity）
TWS 总水资源压力（Total Water Resources Stress）
TWU 总用水量（Total Water Use）

5 资料准备

5.1 基本规定

5.1.1 水稻水足迹核算和评价的空间尺度分为田块尺度、灌区尺度和区域尺度。
5.1.2 水稻水足迹核算和评价的时间尺度分为日尺度、分生育期尺度和全生育期尺度。
5.1.3 在开展水稻水足迹核算和评价时，田块尺度和灌区尺度宜选用日尺度或分生育期尺度，区域尺度宜选用全生育期尺度。
5.1.4 水稻水足迹核算和评价的时间范围可为 1 年、连续多年或非连续多年。非连续多年的水稻水足迹核算应计算多年平均值。
5.1.5 水稻水足迹核算和评价的内容应包括综合用水效率、灌区节水效果、区域水资源可持续性评价等。
5.1.6 水稻水足迹核算和评价的资料收集、整理与核算应符合以下要求：

a) 宜以实测、调查和统计资料为主，补充调查资料为辅；
b) 在资料收集整理的过程中应对资料的真实性、准确性和完整性进行分析复核；应采用自现状年前不少于 5 年的资料序列作为核算时的历史数据；
c) 收集的资料应按照采用的时间评价尺度进行整理；
d) 区域尺度的水稻水足迹核算和评价，应对各监测点数据进行单独收集，整理汇总后进行总体评价。

5.2 田块尺度

5.2.1 田块尺度的水稻水足迹核算和评价，应收集以下资料；基于核算与评价的实际需求，可收集其他资料进行补充。

a) 田块资料，包括田块的尺寸、地理位置、灌溉排水设施布置形式以及灌水方式等，宜通过实地调查获取。
b) 土壤资料，包括土壤质地、容重、饱和含水率、导水率等基础资料，宜通过现场取样测量后获取。
c) 气象资料，包括气候类型、日降水量等，宜通过搜集田块附近气象站点实测资料获取，并应依据生育期的划分进行统一整理。
d) 生育期资料，包括水稻种植日期、收获日期、产量、生育期划分与长度等，宜通过调查实测资料获取。
e) 灌溉排水资料，包括泡田用水量（定额）、灌溉定额、灌水时间、灌水定额（日灌溉用水量）、排水时间、日地表排水量及其中氮素质量浓度、日田间渗漏量及其中氮素质量浓度、日土壤水分（田面水层）资料等，宜通过调查实测资料获取，并应依据作物生育期（包含泡田期）的划分进行统一整理。
f) 水环境质量资料，包括环境最大容许浓度、受纳水体的自然本底浓度和实际浓度，环境最大容许浓度应按照 GB3838 中地表水Ⅴ类水质规定确定；受纳水体的自然本底浓度和实际浓度宜通过调取灌区管理部门的实测资料获取，并符合以下要求：
    1) 受纳水体为自然水体时，自然本底浓度值宜采用实际浓度值；
    2) 若无法获取准确值，自然本底浓度值可假设为 0，且应在核算中进行说明。

5.2.2 应按照资料的类型采取不同方式分别进行资料复核。

a) 调查资料的复核应通过实地走访复核田块基本资料的真实性，并应对已有资料进行补充或更正。

b) 实测资料的复核应满足以下要求：

1) 应通过调查对比相关历史数据，对土壤资料、气象资料及生育期资料的准确性和完整性进行复核；

2) 应依据田间水量平衡方程，对灌溉排水资料的准确性进行复核检查；

3) 对存在明显偏差的数据应予以修正，对存在明显错误的数据可根据实际情况剔除并进行说明。

5.3 灌区尺度

5.3.1 灌区尺度的水稻水足迹核算和评价，应收集以下资料；基于核算与评价的实际需求，可收集其他资料进行补充。

a) 灌区资料，包括灌区的地理位置、土壤、气候等自然地理资料，灌排工程体系、灌溉水源、灌溉方法、灌溉面积、灌区地下水补给量等灌区基本情况资料，宜前往灌区管理部门调查获取。

b) 气象资料，包括日降水量等数据，宜从中国气象数据网的灌区附近气象站点统计数据获取，并应依据水稻生育期进行统一整理。

c) 生产资料，包括水稻生育期、产量、灌水时间、灌水定额、水稻实际蒸散量等数据，宜通过实测资料获取，并应依据生育期进行统一整理。

d) 灌溉排水资料，包括灌入田间的有效水量、末级固定渠道放水量、总排干净排水量、排水中总氮含量等资料，宜通过灌区管理年报、与灌区相关市（县）的水资源公报等水文统计数据获取。

e) 化肥施用资料，包括单位面积折纯的氮肥施用量和总氮的淋溶率，宜通过调查灌区管理年报等农业统计数据获取。实测资料不足的情况下，总氮的淋溶率可参考土壤条件类似的地区资料并进行实地调研分析。

f) 水环境质量资料，收集内容与方法应符合 5.2.1f 要求。

5.3.2 应按照资料的类型采取不同方式分别进行资料复核。

a) 调查资料的复核应通过实地走访复核灌区基本资料的真实性，并应对已有资料进行补充更正。

b) 实测资料的复核应满足以下要求：

1) 应通过搜集比对该灌区水稻生产的历史数据，对水稻生产资料的准确性进行重点复核；

2) 对存在明显偏差的数据，应予以修正；

3) 对存在明显错误的数据，可根据实际情况剔除，并应进行说明。

c) 统计资料的复核应满足以下要求：

1) 应通过核查该灌区相关统计数据的来源，对气象、灌溉排水及化肥施用等统计资料的准确性和完整性进行复核；

2) 对有明显错误或存在偏差的资料数据，应进行复核并予以修正；

3) 对缺失数据应进行说明并评估其重要性；如进行假设应说明假设依据。

5.4 区域尺度

5.4.1 区域尺度的水稻水足迹核算和评价，应收集以下资料；基于核算与评价的实际需求，可收集其他资料进行补充。

a) 研究区资料，包括研究区的地理位置、土壤、气候、耕地面积等，宜通过查阅相关文献资料获取。

b) 气象资料，包括日降雨量、最高温度、最低温度、相对湿度、风速、日照时数、太阳辐射强度等，宜从中国气象数据网的气象站观测资料获取。

c) 生产资料，包括水稻品种、作物种植分布数据、水稻播种面积以及产量、作物实际需水量、水稻复种指数等，宜通过《中国统计年鉴》《中国农业统计资料》等获取，并应满足以下要求：

1) 作物实际需水量宜按照附录 A 的要求进行计算；
2) 水稻复种指数可通过美国地质调查局网站提供的遥感监测数据获取；
3) 水稻产量应明确测产方式，包括测量作物的部位、干重或鲜重等。

d) 用水资料，包括区域实际灌溉面积、单位面积灌溉用水量、总可用水资源量、农业用水量、总用水量，宜通过调查研究区的《水资源公报》及相关水文统计数据获取。在收集区域灌溉面积实测资料不足的情况下，应根据统计年鉴记录的该区域历史有效灌溉面积分析计算年均有效灌溉率，对当年实际灌溉面积进行估算。
e) 化肥施用资料，收集内容与方法应符合 5.3.1e 的要求。
f) 水环境质量相关数据，收集内容与方法应符合 5.2.1f 的要求。

5.4.2 应按照资料的类型采取不同方式分别进行资料复核。

a) 资料的复核，应通过比对调查资料与文献资料中的一致程度复核资料的真实性，并应对已有资料进行补充更正。
b) 统计资料的复核应满足以下要求：
   1) 应通过核查该研究区相关统计数据的来源，对气象、生产、灌溉及化肥农药施用等统计资料的准确性和完整性进行复核；
   2) 对有明显错误或存在偏差的资料数据应予以修正；
   3) 对缺失数据应进行说明并评估其重要性；如进行假设应说明假设依据。

6 田块尺度水稻水足迹计算

6.1 基本步骤

开展田块尺度水稻水足迹计算应按照以下基本步骤进行：

a) 确定核算的时间尺度，可为单日、多日、分生育期、全生育期；
b) 计算水稻生育期各时段田间蒸散量；
c) 计算水稻生育期各时段末田间水量中灌溉水和降水的各自占比；
d) 计算水稻生育期各时段灌溉水和降水的蒸散量；
e) 计算水稻蓝、绿、灰水足迹，并计算水稻水足迹；
f) 计算水稻生产蓝、绿、灰水足迹，并计算水稻生产水足迹。

6.2 计算方法

6.2.1 水稻生育期各时段田间蒸散量应根据每日稻田水量平衡方程计算，具体计算参照公式（1）。

$$ET_{(t)} = P_{(t)} + I_{(t)} - RO_{(t)} - DP_{(t)} - \Delta F_{(t)} \quad \cdots\cdots(1)$$

式中：

$ET_{(t)}$ ——该时段田间蒸散量（mm）；

$P_{(t)}$ ——该时段降水量（mm）；

$I_{(t)}$ ——该时段灌溉用水量（mm）；

$RO_{(t)}$ ——该时段地表排水量（mm）；

$DP_{(t)}$ ——该时段田间渗漏量（mm）；

$\Delta F_{(t)}$ ——相对上一时段田间水量的变化量（mm）。

6.2.2 水稻生育期各时段末田间水量中灌溉水和降水的各自占比，应分别根据各时段稻田蓝水平衡方程和绿水平衡方程计算，具体计算参照公式（2）和公式（3）。

$$F^{I}_{(t)} = F^{I}_{(t-1)} + (P_{(t)} + I_{(t)} - RO_{(t)}) \times \frac{I_{(t)}}{I_{(t)} + P_{(t)}} - (ET_{(t)} + DP_{(t)}) \times \frac{F^{I}_{(t-1)}}{F_{(t-1)}} \quad \cdots\cdots(2)$$

$$F^{P}_{(t)} = F^{P}_{(t-1)} + (P_{(t)} + I_{(t)} - RO_{(t)}) \times \frac{P_{(t)}}{I_{(t)} + P_{(t)}} - (ET_{(t)} + DP_{(t)}) \times \frac{F^{P}_{(t-1)}}{F_{(t-1)}} \quad \cdots\cdots(3)$$

式中：

$F_{(t)}^{I}$ ——该时段末田间水量中来自灌溉水的部分（mm）；

$F_{(t)}^{p}$ ——该时段末田间水量中来自降水的部分（mm）。

$F_{(t-1)}^{I}$——上一时段末田间水量中来自灌溉水的部分（mm）；

$F_{(t-1)}^{p}$——上一时段末田间水量中来自降水的部分（mm）。

6.2.3 水稻生育期各时段灌溉水和降水的蒸散量应分别根据上一时段结束时田间水量中灌溉水和降水各自占比进行计算，具体计算参照公式（4）和公式（5）。

$$ET_{(t)}^{I} = ET_{(t)} \times \frac{F_{(t-1)}^{I}}{F_{(t-1)}} \quad \cdots\cdots (4)$$

$$ET_{(t)}^{p} = ET_{(t)} \times \frac{F_{(t-1)}^{p}}{F_{(t-1)}} \quad \cdots\cdots (5)$$

式中：

$ET_{(t)}^{I}$——该时段灌溉水的蒸散量（mm）；

$ET_{(t)}^{P}$——该时段降水的蒸散量（mm）。

6.2.4 水稻蓝、绿、灰水足迹应分别按照公式（6）~公式（8）进行计算。

$$RWF_{blue} = \sum_{t=1}^{T} ET_{(t)}^{I} \quad \cdots\cdots (6)$$

式中：

RWF_{blue}——水稻蓝水足迹（mm）；

T ——水稻生育期时段总数。

$$RWF_{green} = \sum_{t=1}^{T} ET_{(t)}^{P} \quad \cdots\cdots (7)$$

式中：

RWF_{green}——水稻绿水足迹（mm）。

$$RWF_{\text{grey}} = \frac{\sum_{t=1}^{T} (C_{N(t)}^{s} \times RO_{(t)} + C_{N(t)}^{g} \times DP_{(t)})}{C_m - C_n} \quad \cdots\cdots (8)$$

式中：

RWF_{grey} ——水稻灰水足迹（mm）；

$C_{N(t)}^{s}$ ——该时段地表排水量中氮素质量浓度（mg/L）；

$C_{N(t)}^{g}$ ——该时段田间渗漏量中氮素质量浓度（mg/L）；

C_m ——环境最大容许浓度（mg/L）；

C_n ——自然本底浓度（mg/L）。

注：总氮的环境最大容许浓度参考《地表水环境质量标准》（GB3838—2002）中的地表水Ⅴ类水质规定的总氮的浓度上限取值为 2.0 mg/L。

6.2.5 水稻水足迹应按照公式（9）进行计算。

$$RWF = RWF_{blue} + RWF_{green} + RWF_{grey} \quad \cdots\cdots (9)$$

式中：

RWF ——水稻水足迹（mm）。

6.2.6 水稻生产水足迹应按照公式（10）进行计算。

$$RWFP = \frac{10 \times RWF}{Y} \quad \cdots\cdots (10)$$

式中：

$RWFP$——水稻生产水足迹（m^3/kg）；
10 ——单位转换系数；
RWF ——水稻水足迹（mm 或 m^3）；
Y ——水稻单位面积的产量（kg/hm^2）。
注：将公式（10）中的水稻水足迹（RWF）替换为水稻蓝、绿、灰水足迹即可计算相应的水稻生产蓝（$RWFP_{blue}$）、绿（$RWFP_{green}$）、灰水足迹（$RWFP_{grey}$）。

7 灌区尺度水稻水足迹计算

7.1 基本步骤

开展灌区尺度水稻水足迹计算应按照以下基本步骤进行：
a) 计算有效降水量；
b) 计算作物灌溉用水量；
c) 计算渠系输水损失量；
d) 计算水稻蓝绿水足迹；
e) 计算水稻灰水足迹及水稻水足迹；
f) 计算水稻生产蓝、绿及灰水足迹。

7.2 计算方法

7.2.1 水稻水足迹

a) 水稻蓝、绿水足迹

实际灌入田间的有效水量的计算参照公式（11）：

$$Q_{\mathrm{i}} = 10 \times (ET_a - P_e) \times S_a \quad \cdots\cdots(11)$$

式中：
Q_{i} ——实际灌入田间的有效水量（m^3）；
ET_{a} ——水稻实际蒸散量（mm）；
P_{e} ——有效降水量（mm）；
S_a ——实际灌溉面积（hm^2）。
注：附录 B 中给出了有效降水量 P_{e} 的参考计算方法

渠系输水损失量的计算参照公式（12）：

$$Q_c = Q_{\mathrm{g}} - Q_n \quad \cdots\cdots(12)$$

式中：
Q_c ——渠系输水损失量（m^3）；
Q_{g} ——总干渠从水源引水的流量（m^3）；
Q_{n} ——农渠向田间供水的流量（m^3）。

水稻蓝、绿水足迹的计算分别见公式（13）和公式（14）：

$$RWF_{blue} = Q_{\mathrm{i}} + Q_c + Q_{\mathrm{d}} \quad \cdots\cdots(13)$$

$$RWF_{green} = 10 \times P_{\mathrm{e}} \times S_a \quad \cdots\cdots(14)$$

式中：
Q_d ——灌区地下水补给量（m^3）。

b) 水稻灰水足迹

水稻灰水足迹的计算参照公式（15）：

$$RWF_{grey} = \frac{\alpha \times M}{C_{\mathrm{m}} - C_{\mathrm{n}}} \quad \cdots\cdots(15)$$

式中：
α ——总氮的淋溶率；

M ——氮肥施用量（kg/hm^2）；
C_m——环境最大容许浓度（mg/L）；
C_n ——自然本底浓度（mg/L）。
注：总氮的淋溶率取值参考范围为 5%~25%，具体取值需参考土壤条件类似地区的实测资料。

c) 水稻水足迹

水稻水足迹的计算同本标准第 6 节田块尺度中公式（9）。
注：灌区尺度水足迹计算所采用的单位与田间尺度不同，采用 m^3。

7.2.2 水稻生产水足迹

水稻生产水足迹的计算参照公式（16）：

$$RWFP = \frac{RWF}{Y} \quad \cdots\cdots(16)$$

式中：
Y——灌区水稻总产量（kg）。
注：将公式（16）中的水稻水足迹（RWF）分别替换成水稻蓝、绿、灰水足迹即可计算相应的水稻生产蓝（$RWFP_{blue}$）、绿（$RWFP_{green}$）、灰水足迹（$RWFP_{grey}$）。

8 区域尺度水稻水足迹计算

8.1 基本步骤

开展区域尺度水稻水足迹计算应按照以下基本步骤进行：
a) 计算水稻蓝水足迹；
b) 计算有效降水量；
c) 计算水稻绿水足迹；
d) 计算水稻灰水足迹及水稻水足迹；
e) 计算水稻生产蓝、绿及灰水足迹。

8.2 计算方法

8.2.1 水稻水足迹

a) 水稻蓝水足迹

水稻蓝水足迹的计算参照公式（17）：

$$RWF_{blue} = IR \times S_a \quad \cdots\cdots(17)$$

式中：
IR——单位面积灌溉用水量（m^3/hm^2）；
S_a ——实际灌溉面积（hm^2）。

b) 水稻绿水足迹

水稻绿水足迹的计算参照公式（18）：

$$RWF_{green} = \frac{10 \times \min(ET_c, P_e) \times S}{\lambda} \quad \cdots\cdots(18)$$

式中：
ET_c ——作物需水量（mm）；
P_e ——有效降水量（mm）；
S——水稻播种面积（hm^2）；
λ——水稻复种指数。
注：附录 A 中给出了作物需水量的计算方法

c) 水稻灰水足迹

水稻灰水足迹的计算参照本标准第 7 节灌区尺度中公式（15）。

d) 水稻水足迹

水稻水足迹的计算参照本标准第 6 节田块尺度中公式（9）。

注：区域尺度水足迹计算所采用的单位与田间尺度不同，采用 m^3。

8.2.2 水稻生产水足迹

水稻生产水足迹的计算同本标准第 7 节灌区尺度中公式（16）。

注：式中 Y 为区域水稻总产量（kg）。

9 水稻水足迹分析评价

9.1 基本规定

9.1.1 田块尺度的水稻水足迹评价应针对综合用水效率进行评价。

9.1.2 灌区尺度的水稻水足迹评价除针对综合用水效率进行评价外，还应增加工程节水效果评价。

9.1.3 区域尺度的水稻水足迹评价除针对综合用水效率进行评价外，还应增加水资源可持续性评价。

9.2 综合用水效率评价

9.2.1 综合用水效率评价应包括总体调控与利用水平的评价、有效利用程度评价和产出能力评价。

9.2.2 总体调控与利用水平的评价

总体调控与利用水平的评价应以水稻水足迹及其蓝-绿-灰构成比例作为评价依据。

水稻水足迹（*RWF*）值越大，则水稻生产过程实际消耗的水量越大。

蓝水和绿水均属于消耗性用水。蓝、绿水足迹总和代表消耗性水足迹，这一比例越大，则水足迹有效利用的部分越多，利用水平越高。蓝、绿水足迹总和所占比例应按照公式（19）进行计算。

$$PRO_{\mathrm{con}} = \frac{RWF_{blue} + RWF_{\mathrm{green}}}{RWF} \quad \cdots\cdots(19)$$

式中：

PRO_{con}——消耗性水足迹占比。

蓝水是农业用水消耗的主要途径。蓝水足迹比例超过一半时，则表明农业用水的调控水平较低，即作物生产过多依赖灌溉水而缺乏对绿水的调控和利用，用水效果相对较差。蓝水足迹比例应按照公式（20）进行计算。

$$PRO_{blue} = \frac{RWF_{\mathrm{blue}}}{RWF} \quad \cdots\cdots(20)$$

式中：

PRO_{blue}——蓝水足迹占比。

注：若所选的评价时间尺度为日尺度或分生育期尺度，应分析水稻生育期不同阶段的水足迹变化情况；全生育期尺度应分析水稻水足迹的年际变化。

9.2.3 有效利用程度评价

将农业用水有效利用率指标（蓝水效率、绿水效率、总水资源效率）作为农业用水有效利用程度的评价依据。当农业用水有效利用率指标越大，表示农业用水有效利用程度越高。各有效利用率指标的具体计算参照公式（21）~公式（23）：

$$BWE = \frac{RWF_{\mathrm{blue}}}{BWI} \quad \cdots\cdots(21)$$

$$GWE = \frac{RWF_{\mathrm{green}}}{GWI} \quad \cdots\cdots(22)$$

$$TWE = \frac{RWF_{\mathrm{blue}} + RWF_{\mathrm{green}}}{BWI + GWI} \quad \cdots\cdots(23)$$

式中：

BWE ——蓝水效率;
GWE ——绿水效率;
TWE ——总水资源效率;
BWI ——蓝水投入量（mm 或 m^3）;
GWI ——绿水投入量（mm 或 m^3）。

注：田间尺度蓝水投入量为生育期田间总灌水量；灌区尺度蓝水投入量为生育期从水源处引的毛灌溉用水量；区域尺度蓝水利用效率即灌溉效率。

9.2.4 产出能力评价

将水稻生产水足迹和产出能力指标（蓝水生产力、绿水生产力、总水资源生产力）作为水分产出能力的评价依据。水稻生产水足迹中绿水占比越大，说明水稻生产过程的水分耗用结构更合理，综合利用效益越高。水稻生产水足迹倒数为水分产出能力，当生产力指标值越大，表明灌区水分产出能力越高。蓝、绿水生产力及水分生产力的具体计算参照公式（24）~公式（26）：

$$BWP = \frac{1}{RWFP_{\text{blue}}} \quad \cdots\cdots(24)$$

$$GWP = \frac{1}{RWFP_{\text{green}}} \quad \cdots\cdots(25)$$

$$TWP = \frac{1}{RWFP_{\text{blue}} + RWFP_{\text{green}}} \quad \cdots\cdots(26)$$

式中：
BWP ——蓝水生产力（kg/m^3）;
$RWFP_{\text{blue}}$ ——水稻生产蓝水足迹（m^3/kg）;
GWP ——绿水生产力（kg/m^3）;
$RWFP_{\text{green}}$ ——水稻生产绿水足迹（m^3/kg）;
TWP ——总水资源生产力（kg/m^3）。

9.2.5 基于综合用水效率评价结果，应针对具体问题提出水足迹调控的相关建议。下面列出了可能出现的典型问题及建议，包括但不限于以下方面：

a) 存在问题：消耗结构不合理；相关建议：因地制宜采取高效节水灌溉措施；调整化肥施用策略，完善稻田水环境监测网络，减少污染物的淋溶量。
b) 存在问题：有效利用程度低；相关建议：改进水稻生育期内的稻田灌溉排水制度，注重提升灌溉技术水平，增加蓝绿水资源有效利用量。
c) 存在问题：产出能力低；相关建议：推广高产水稻品种和先进农作技术，提高水稻单位面积产量，降低作物生产水足迹，促进农业集约化生产。

9.3 灌区节水效果评价

9.3.1 灌区节水效果评价应包括：工程节水效果评价、田间节水效果评价、用水管理水平评价三方面的内容。

9.3.2 评价方法

a) 工程节水效果评价
将渠系水利用系数作为工程节水的评价依据。渠系水利用系数用末级固定渠道输出水量之和与干渠渠首引入水量的比值来表示，根据收集的灌区水量数据进行计算。当渠系水利用系数值越大，表明渠系水量损失越小，灌区工程运行状况越好。具体计算参照公式（27）：

$$\eta_s = \frac{Q_{\text{n}}}{Q_{\text{g}}} \quad \cdots\cdots(27)$$

式中：
η_s ——渠系水利用系数;

Q_n——农渠向田间供水的流量（m^3）；

Q_g——总干渠从水源引水的流量（m^3）。

b) 田间节水效果评价

将田间水利用系数作为田间节水的评价依据。田间水利用系数用实际灌入田间的有效水量和末级固定渠道放出水量的比值来表示，根据收集的灌区水量数据进行计算。当田间水利用系数值越大，表明灌区田间灌水技术水平越高。具体计算参照公式（28）：

$$\eta_f = \frac{S_a \times m_n}{W_{农净}} \quad \cdots\cdots(28)$$

式中：

η_f ——田间水利用系数；

S_a ——农渠实际灌溉面积（hm^2）；

m_n ——净灌水定额（m^3/hm^2）；

$W_{农净}$——农渠供给田间的水量（m^3）。

c) 用水管理水平评价

将灌溉水利用系数作为用水管理水平的评价依据。灌溉水利用系数用实际灌入农田的有效水量和渠首引入水量的比值来表示，根据收集的灌区水量数据进行计算。当灌溉水利用系数值越大，表明灌区综合管理水平越高，具体计算参照公式（29）：

$$\eta_0 = \frac{A \times m_n}{W_g} \quad \cdots\cdots(29)$$

式中：

η_0 ——灌溉水利用系数；

A ——全灌区的灌溉面积（hm^2）；

m_n——净灌水定额（m^3/hm^2）；

W_g——某次灌水渠首引入的总水量（m^3）。

9.3.3 可能存在的问题与对策

基于以上分析评价，应针对具体问题提出水足迹调控的相关建议，下面列出了可能出现的典型问题及建议，包括但不限于以下方面：

a) 存在问题：工程节水效果较差；相关建议：充分挖掘灌区节水潜力，建立从渠首到田间再到排水的全过程节水体系。检查灌区各处农田水利工程配套和运行状况，改善农田基础设施条件，推广先进输配水技术的使用，减少灌溉过程水量损失与无效消耗。

b) 存在问题：田间节水效果较差；相关建议：因地制宜地选择合适的高效节水技术来增强田间节水效果。在水稻种植前进行土地平整，提高灌溉均匀度。

c) 存在问题：灌区用水管理水平较低；相关建议：发挥灌区水管理的调节作用，可通过以农业水价改革的方式建立健全灌区节水体制机制，提升灌区用水管理水平。

9.4 水稻水足迹可持续性评价

区域尺度往往涉及的空间范围更广，涉及的农业水资源量更大，水稻生产会加剧区域水资源压力，影响水足迹可持续性，应增加水稻生产过程水资源可持续性评价，通过比对分析增强水足迹评价在区域水资源利用效用评价的科学性和客观性。

9.4.1 评价内容

区域水稻水足迹可持续性评价应包括：区域蓝水、绿水以及总水资源可持续性评价三方面的内容。

9.4.2 评价方法

a) 蓝水资源可持续性评价

将蓝水资源压力作为蓝水资源可持续性的评价依据。蓝水资源压力反映区域蓝水资源对作物生长耗水的满足程度。蓝水资源压力值越大，表明区域蓝水资源在满足作物正常生长发育消耗上的压力越大，区域蓝水资源可持续性越差。蓝水资源压力指标的计算参照公式（30）和公式（31）：

$$BWS = \frac{RWF_{\text{blue}}}{BWA} \quad \cdots\cdots(30)$$

$$BWA = TWA \times \frac{AWU}{TWU} \quad \cdots\cdots(31)$$

式中：

BWS ——蓝水资源压力;

BWA ——可用蓝水资源量（m^3）;

TWA ——总可用水资源量（m^3）;

AWU ——农业用水量（m^3）;

TWU ——总用水量（m^3）。

b) 绿水资源可持续性评价

将绿水资源压力作为绿水资源可持续性的评价依据。绿水资源压力反映区域绿水资源对作物生长耗水的满足程度。绿水资源压力值越大，表明区域绿水资源在满足作物正常生长发育消耗上的压力越大，区域绿水资源可持续性较差。绿水资源压力指标的计算参照公式（32）和公式（33）：

$$GWS = \frac{RWF_{\text{green}}}{GWA} \quad \cdots\cdots(32)$$

$$GWA = 10 \times A \times P_{\text{e}} \quad \cdots\cdots(33)$$

式中：

GWS ——绿水资源压力;

GWA ——可用绿水资源量（m^3）;

A ——区域耕地面积（hm^2）;

P_{e} ——区域年有效降水量（mm）。

c) 总水资源可持续性评价

将总水资源压力作为总水资源可持续性的评价依据。总水资源压力反映总水资源在满足农业生产过程对水资源及水环境需求的能力。总水资源压力越大，表明区域农业生产与水资源关系不可持续，区域面临较大的水资源和水环境压力。总水资源压力指标的计算参照公式（34）：

$$TWS = \frac{RWF_{\text{blue}} + RWF_{\text{green}}}{TWA} \quad \cdots\cdots(34)$$

式中：

TWS ——总水资源压力。

9.4.3 可能存在的问题与对策

基于以上分析评价，应针对具体问题提出水足迹调控的相关建议，下面列出了可能出现的典型问题及建议，包括但不限于以下方面：

a) 存在问题：蓝水资源可持续性较差；相关建议：改善灌溉设施和农艺技术减少蓝水足迹或借助跨区域引水来缓解区域蓝水资源压力。

b) 存在问题：绿水资源可持续性较差；相关建议：加强气象预测，根据降水预报及时调整区域灌溉制度来提高绿水资源利用率，缓解区域绿水资源压力。

c) 存在问题：总水资源可持续性较差；相关建议：调整作物种植规模，优化作物种植结构，提升农业生产与水资源、水环境的相适应程度；加快农业技术推广，提高总水资源的可持续性。

9.5 水稻水足迹核算与评价报告

水稻水足迹核算与评价报告应至少包括以下组成部分：

a) 研究区概况；
b) 评价目的、范围及内容；
c) 数据与方法；
d) 水足迹核算过程与结果；
e) 水足迹分析评价；
f) 水足迹调控对策建议。

附 录 A

（资料性）

作物需水量的计算方法

水稻生育期需水量的确定采用 FAO 推荐的公式, 按照公式（A.1）进行计算：：

$$ET_c = K_c \times ET_0 \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots（A.1）$$

式中：

ET_c ——作物需水量，mm/d；

K_c ——作物系数；

ET_0 ——参考作物蒸散量，mm/d。

注：其中 K_c 随作物品种及生育阶段而异，可参考相关文献资料或从区域灌溉试验站获取。

参考作物蒸散量（ET_0）的计算采用 FAO（1998）推荐的 Penman-Monteith 公式计算。按照公式（A.2）进行计算：

$$ET_0 = \frac{0.408\Delta\left(R_n - G\right) + \gamma \frac{900}{T+273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34u_2)} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots（A.2）$$

式中：

R_n ——作物表面净辐射（MJ/(m^2・d)）；

G ——土壤热通量密度（MJ/(m^2・d)）；

γ ——湿度计常数（kPa/℃）；

T ——2m 高处的平均气温（℃）；

u_2 ——2m 高处的风速（m/s）；

e_s ——饱和水汽压（kPa）；

e_a ——实际水汽压（kPa）；

Δ ——温度水汽压曲线的斜率（kPa/℃）；

注 1：其中 R_n、G、Δ、U_2 可通过气象台站观测资料计算求得。

注 2：参考作物蒸散量（ET_0）也可以利用作物模型直接进行计算。

附 录 B

（资料性）

有效降水量的计算方法

B.1 有效利用系数计算法常用于生产实践中有效降水量的估算。按照公式（B.1）进行计算：

$$P_e = \sum_{\mathrm{i}}^{T} \alpha \times P_{\mathrm{i}} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \text{（B.1）}$$

式中：

P_{e} ——作物全生育期有效降水量（mm）；

T ——作物生育期总天数；

α ——降水有效利用系数；

P_i ——作物生育期内的日降水量（mm）。

注：降水有效利用系数α一般需根据各地条件并进行试验研究后确定。

B.2 USDA-SCS 计算法由美国农业部土壤保持局提出，是目前众多有效降水量计算方法中得到公认和普遍推广的方法之一，对不同气候条件和作物的适用性强，通常用于大规模有效降水量估算。按照公式（B.2）进行计算：

$$P_{e,10} = \begin{cases} P_{10} \times \dfrac{(4.17 - 0.02 \times P_{10})}{4.17} & (P < 83\mathrm{mm}) \\ 41.7 + 0.1 \times P_{10} & (P \geq 83\mathrm{mm}) \end{cases} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots \text{（B.2）}$$

式中：

P_{10} ——旬降水量（mm）；

$P_{\mathrm{e},10}$ ——旬有效降水量（mm）。

注：“旬”为连续的 10 天，作物生育期内的有效降水量可由各旬有效降水累加得到。