

基于三维水足迹模型的农业用水可持续性评估

王玉宝^{1,2} 吴楠^{1,2} 张富尧^{1,2} 李鑫^{1,2} 刘荣^{1,2} 殷杰玲^{1,2}

(1. 西北农林科技大学旱区农业水土工程教育部重点实验室, 陕西杨凌 712100;
2. 西北农林科技大学中国旱区节水农业研究院, 陕西杨凌 712100)

摘要: 为探究我国农业用水可持续状况,从淡水资源作为一种关键自然资本的角度出发,结合三维水足迹、降尺度行星边界和脱钩分析等方法,计算并分析了31个省级行政区1998—2020年农业水资源利用的时空变化。结果表明,我国农业用水状况整体良好,但区域间农业水资源利用可持续状况差异较大。降水量少或社会经济用水多的华北、华东和西北地区农业水资源供需矛盾较为突出,降水丰腴的西南和华南地区农业水资源可持续状况较好。在居民节水意识增强和政策约束的情况下,北京、河北、山西和上海的农业用水可持续状况呈变好态势;在降水年际差异大和农业用水占比变化的影响下,辽宁、江苏、山东、河南和甘肃的农业用水可持续状况呈突变型,存量和流量间占用关系无明显变化规律。浙江表现出最好的农业水-经济关系类型,北京则相反;2014年后北京和上海高频出现了最差的农业水-经济类型6,经济发展与资源环境间矛盾愈发严峻。研究可为农业用水及种植业规划提供参考。

关键词: 三维水足迹; 农业可持续用水; 行星边界; 脱钩分析

中图分类号: TV213.4; S279 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2023)01-0287-09 OSID: 

Assessment of Agricultural Water Sustainability Based on 3D Water Footprint Model

WANG Yubao^{1,2} WU Nan^{1,2} ZHANG Fuyao^{1,2} LI Xin^{1,2} LIU Rong^{1,2} YIN Jieling^{1,2}

(1. Key Laboratory of Agricultural Soil and Water Engineering in Arid and Semiarid Areas, Ministry of Education, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China

2. Institute of Water Saving Agriculture in Arid Regions of China, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: To explore the sustainable status of agricultural water withdrawal in China, the spatial and temporal changes of agricultural water use in 31 provincial administrative regions from 1998 to 2020 were calculated and analyzed, at the perspective of freshwater resources as a key natural capital, which combining 3D water footprint, downscaled planetary boundaries and decoupling analysis. The results showed that the overall agricultural water withdrawal in China was good, but the sustainable status of regional agricultural water withdrawal varied greatly. The contradiction between water supply and demand was more prominent in North China, East China and Northwest China, where precipitation was low or social and economic water withdrawal was high, while the sustainable situation of water resources in Southwest China and South China, where precipitation is abundant, was better. Under the influence of residents' increasing awareness of water conservation and policy constraints, agricultural water sustainability in Beijing, Hebei, Shanxi, and Shanghai was becoming better; under the influence of large inter-annual differences in precipitation and changes in the proportion of agricultural water use, agricultural water sustainability in Liaoning, Jiangsu, Shandong, Henan, and Gansu was abruptly changing, and there was no obvious pattern of change in the occupancy relationship between stocks and flows. Zhejiang showed the best performance of agricultural water – economy relationship, while Beijing showed the opposite; the worst type of agricultural water – economy 6 emerged in Beijing and Shanghai frequently after 2014. The contradiction between economic development and resources environment was becoming more and more severe. The research results can provide reference for agricultural water use and plantation planning.

Key words: 3D water footprint; sustainable water use in agriculture; planetary boundaries; decoupling analysis

0 引言

自然资本是为人们带来利益流量的可再生和不可再生的资源存量(如植物、动物、空气、水、土壤和矿物)^[1],通常被划分为自然资本流量和自然资本存量,前者为一定地理空间和特定时间内的可再生资源 and 生态服务流量,后者可以再生前者,并在其供不应求时进行补充^[2]。强可持续背景下,维持资本存量的不减少是可持续发展的最低限度。淡水资源作为一种关键自然资本,对人类福祉至关重要。农业是需水最大的部门,在我国占全行业用水的 62.1%^[3],农业水资源短缺和供需不平衡的问题日益突出,已经成为威胁我国粮食安全的关键因素之一。

水足迹是衡量全生育周期作物水资源需求量的有效指标,应用范围涵盖全球^[4]、国家^[5-6]、流域^[7]、地区^[8]、灌区^[9]和田块^[10]等尺度。但传统水足迹方法无法区分可持续和不可持续的用水部分^[11],这限制了其在可持续评价方面的应用。三维足迹利用足迹深度、足迹广度分别表达对资本存量、资本流量的耗用,可以衡量自然资本占用的代际公平和代内公平^[12-13],丰富了可持续性表达功能。FANG 等^[14]应用三维水足迹衡量了贵阳市自然资本利用状况,熊鸿斌等^[15]利用三维水足迹模型评估了安徽省水资源利用可持续性状况。以上研究在区域水资源流量和存量的界限划分上较模糊,并且三维水足迹模型仍缺乏更广泛的实践与应用。

在可持续发展的大背景下,应将水资源的占用维持在水弹性范围之内^[16]。ROCKSTROM 等^[17]提出了行星边界的概念,划定了包括全球淡水资源在内的 9 个行星边界值,当边界门槛被突破时,弹性将被削弱。行星边界的提出和量化有助于防止人类活动造成不可逆转的环境变化^[18]。水行星边界提供了人类水资源占用是否可持续的基准,此基准在地球系统不同尺度上运行,包含更高空间分辨率的国家一级^[19]和省域一级^[20-21]。关于边界值的降尺度方法,LUCAS 等^[22]采用 3 种不同的分配方法,即基于环境压力份额的祖父化(Grandfathering)方法、基于人均 GDP 的支付能力分配法和基于人口份额的人均平等分配法,将全球边界分配至大型经济体并结合不同环境足迹进行比较。

行星边界和足迹指标的结合以直接的方式表达了环境可持续性^[23]。农业灌溉是我国最主要的水资源消耗方式,通过降尺度行星边界方法界定区域农业用水的安全空间,结合三维水足迹模型评估区域农业用水可持续状况,能帮助提供农业用水可持

续发展政策,并提高居民对水资源这一重要自然资源的节约和保护意识。本文将三维水足迹模型与降尺度行星边界相结合,探究 1998—2020 年中国大陆 31 个省级行政区的农业用水可持续状况;分析区域农业水足迹深度、农业水足迹广度、农业水资源赤字率和盈余率时空变化;讨论区域农业三维水足迹和区域农业生产总值间的变化关系,以期为中国农业用水可持续发展提供参考。

1 方法与数据

本研究的基本思路如图 1 所示。即先采用自下而上的方法核算年际可再生的区域淡水资源流量,然后采用祖父化方法划定农业部门的环境份额,得到农业可利用水资源量;核算区域农业水足迹,计算获得水足迹广度、水足迹深度和农业水资源盈余(赤字)率,分析时空变化关系;最后利用脱钩分析理论,得到水足迹深度和水足迹广度与经济发展间变化关系,划分区域农业水-经济类型。

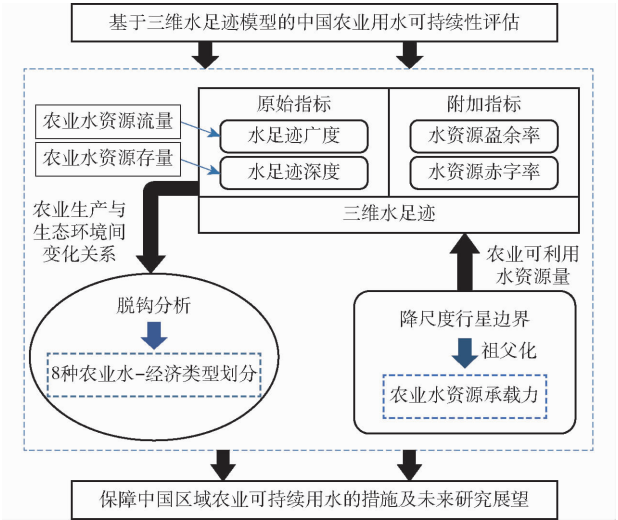


图 1 研究思路示意图

Fig.1 Schematic of research ideas

1.1 区域农业可利用水资源量

作为重要的自然资本之一,淡水资源的全球占用量虽未超过行星边界值,但在国家等更高空间分辨率层级存在区域淡水边界值已经被超越或受威胁程度加剧的情况^[20-21]。流域控制变量的划定基于“环境流量”的概念,该概念为维持环境和生态健康的保留量。本研究取 40% 当地淡水资源量为可利用部分^[24],区域内可更新的淡水资源流量采用自下而上的方法核算。区域可利用蓝水资源量计算式为

$$W_{A,region} = 0.4 W_L + W_T + W_{NPI} \tag{1}$$

式中 $W_{A,region}$ ——区域可利用蓝水资源量, m^3
 W_L ——当地水资源量, m^3

W_T ——过境水量,也称为客水量,考虑数据可用性,数值取自黄河等各主要河水分水量计划(已考虑维护河流生态环境健康的水量), m^3

W_{NPI} ——净物理进口水量,主要考虑南水北调工程应急调水量、南水北调工程东线、中线开通后调水量和引滦调水量等, m^3

只关注提高农业用水效率并不能保证农业用水的可持续性,选择祖父化法^[22]划分区域农业部门可利用水资源量,即采用农业部门在水资源压力中的份额分配各省级行政区农业可用水量。

1.2 三维水足迹

1.2.1 作物生产蓝水足迹

作物生产消耗性的广义水资源量由蓝水足迹和绿水足迹共同组成,前者定义为作物生长过程中所消耗的地表水和地下水量,后者为消耗的有效降水量^[25]。绿水足迹多作为背景水足迹考虑,用于维持生态系统运行^[26]。本研究目的为评价区域农业生产中水资源利用的可持续状况,因此仅考虑蓝水足迹。中国的灌溉水量占农业用水量的近 90%,由于耗水数据难以完整获取,本文中将农业用水量定义为农业蓝水足迹。

1.2.2 水足迹广度

水足迹广度表征为人类对年际可再生淡水资源流量的占用,具有空间特性。农业水足迹广度用以核算区域内农业水资源可利用量的实际占用量,计算式为

$$W_{F,size} = \min(W_{F,agr}, W_{A,agr}) \tag{2}$$

式中 $W_{F,size}$ ——农业水足迹广度, m^3

$W_{F,agr}$ ——农业水足迹, m^3

$W_{A,agr}$ ——农业可利用水量, m^3

1.2.3 水足迹深度

水足迹深度反映区域内再生年际所使用淡水资源流量的年数,或维持区域内淡水资源占用水平下所需占用的区域淡水资源流量的倍数,具有时间特性。水足迹深度由“自然深度”(为 1)和“附加深度”构成:自然深度下,人类活动对淡水资源占用不超过可恢复能力;当产生“附加深度”时,即水足迹深度大于 1 时,认为人类活动开始侵占淡水资源存量,对淡水资源的使用处于不可持续状态。农业水足迹深度反映农业水资源利用可持续状况,计算式为

$$W_{F,depth} = 1 + \frac{\max(W_{F,agr} - W_{A,agr}, 0)}{W_{A,agr}} \tag{3}$$

式中 $W_{F,depth}$ ——农业水足迹深度

1.2.4 附加指标

当区域农业可利用水资源量未被充分利用时,农业水足迹深度保持在自然深度,无法体现区域间农业水资源利用差异情况,因此引入农业水资源盈余率反映年际和区域间农业可利用水资源实际占用情况,计算式为

$$R_{WS,agr} = \frac{W_{A,agr} - W_{F,agr}}{W_{A,agr}} \times 100\% \quad (W_{F,depth} = 1) \tag{4}$$

式中 $R_{WS,agr}$ ——农业水资源盈余率, %

产生农业水足迹附加深度时,引入农业水资源赤字率反映农业生产活动对环境干扰程度,计算式为

$$R_{WD,agr} = \frac{W_{F,agr} - W_{A,agr}}{W_{A,agr}} \times 100\% \quad (W_{F,depth} > 1) \tag{5}$$

式中 $R_{WD,agr}$ ——农业水资源赤字率, %

1.3 农业水-经济关系划分

脱钩理论最初源于物理领域,后逐渐被用于评估区域资源环境与经济发展间的变化关系,经济增长与资源环境变化间不相互依赖称为脱钩^[27]。分别比较区域农业水足迹深度、区域农业水足迹广度和区域农业生产总值(GFP)的变化关系,能够分别得到 4 种类型的水存量-经济关系和 4 种类型的水流量-经济关系(表 1)。水存量-经济关系和水流量-经济关系的进一步组合,得到 8 种类别的农业水-经济关系(图 2),帮助衡量农业经济发展与农业用水可持续状况间的变化关系。

表 1 三维水足迹与经济发展间变化关系
Tab.1 Relationship between 3D water footprint and economic development

水存量-经济		水流量-经济		
脱钩	弱脱钩:水足迹深度不增加,农业生产总值下降	强脱钩:水足迹深度不增加,农业生产总值增加	弱脱钩:水足迹广度和农业生产总值均下降	强脱钩:水足迹广度减少,农业生产总值下降
	弱耦合:水足迹深度和农业生产总值均增加	强耦合:水足迹深度增加,农业生产总值下降	弱耦合:水足迹广度和农业生产总值均增加	强耦合:水足迹广度增加,农业生产总值下降

根据水足迹深度和水足迹广度的概念,当水足迹深度维持在自然深度内是可持续的;水足迹广度越小,则资本流量占用越少。水存量、水流量与经济发展间的关系呈强脱钩时最好,强耦合时最差。但是,水足迹深度和广度存在一定的内在关系,相互组合后的状态则呈现不同的结果。在自然深度内,水足迹广度的增加不影响水资源利用可持续状况;超

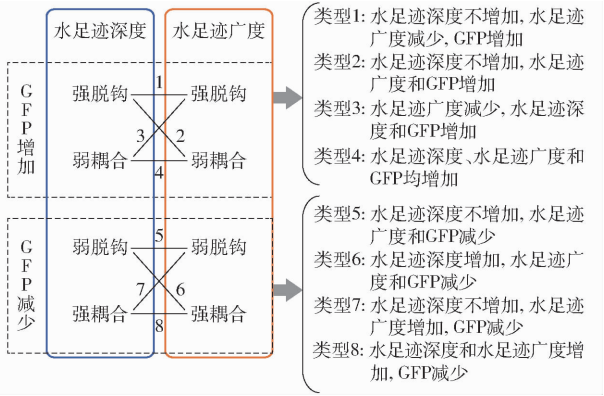


图2 农业水-经济关系及其分类

Fig.2 Agricultural water – economy relationship and its classification

出自然深度,水足迹广度越大则代表水资源承载能力越大。因此,图2中8种农业水-经济类型从优到劣(优先考虑农业用水可持续,再考虑农业经济变化情况)依次为类型1、类型2、类型5、类型7、类型4、类型3、类型8、类型6。

1.4 数据来源

本文研究时段为1998—2020年,历年各省级行政区农业用水量、水资源量数据来源于《中国水资源公报》(1998—2020)。农业生产总值数据来源于《中国统计年鉴》(1999—2021)。过境水量采用主要河流分水量数据,相关政策文件取自国务院网站(<http://www.gov.cn/guowuyuan/>)。跨区域工程性调水数据从物理水调运相关省级行政区水资源公报和《南水北调工程建设年鉴》获得。江苏和上海的供用水量依靠丰富的长江和太湖的过境水量,情况较为复杂,水资源核算时需要考虑引用的过境水量。上海引用的过境水量主要考虑长江和太湖,长江引水量参考《上海市水资源公报》,另考虑38%的用水量来源于太湖来水量^[28];江苏对长江引水量数据参考《江苏省水资源公报》。

2 结果与分析

2.1 中国农业三维水足迹时空格局

水足迹深度维持在自然深度内,水足迹广度越大,表明区域水资源承载能力越高,可持续性越强。1998—2020年中国农业用水整体状况较好,农业水足迹深度一直处于自然深度状态,年均农业水足迹广度为 $2.96 \times 10^{11} \text{ m}^3$ 。图3为区域农业三维水足迹年均状况,反映了空间差异状况。

1998—2020年有12个省级行政区处于农业用水不可持续的状态。其中,北京和宁夏的水足迹深度最大,农业用水不可持续状态最为严重,至少需要3.5以上现有区域水资源流量才能满足当地农业水

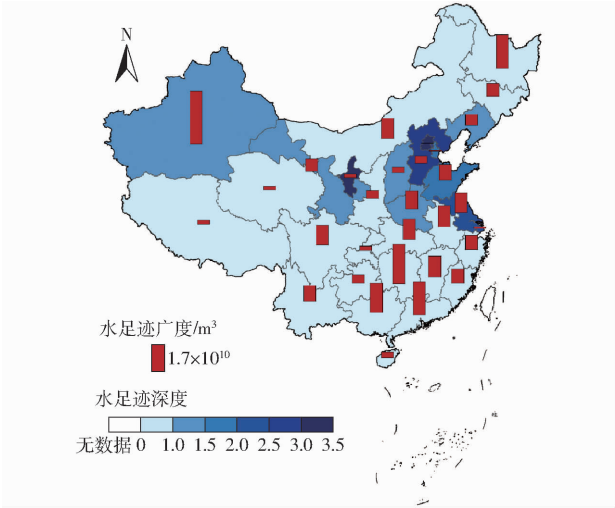


图3 1998—2020年中国年均三维水足迹

Fig.3 Annual average 3D water footprint of China from 1998 to 2020

资源需求量。其次为河北(3.07)、上海(2.41)和江苏(2.13)。天津(1.86)、山东(1.55)、新疆(1.30)、辽宁(1.26)、河南(1.08)、甘肃(1.08)和山西(1.01)也处于不同程度的农业用水不可持续性状态。作为中国棉花的最大生产区域,新疆年均农业水足迹广度高达 $3.42 \times 10^{10} \text{ m}^3$,其资源承载能力仍不足以满足其需求。北京为年均水足迹广度最小的省级行政区,仅为 $2.95 \times 10^8 \text{ m}^3$,资源承载能力不足为其农业生产带来了更大的压力。

不同省级行政区在水资源禀赋、人口和社会经济发展等方面存在巨大差异,区域淡水资源占用呈现不同的特点。选取1998、2000、2005、2010、2015、2020年进行时间序列分析(图4,图中98、00、05、10、15、20分别代表1998、2000、2005、2010、2015、2020年)。人口密集、经济发达的华北和华东地区,以及气候干旱的西北地区水资源供需矛盾较为突出,降水丰腴的西南和华南地区水资源可持续性状况较好。各地区农业用水可持续性状况与降水年型有较大关联,随时间无明显变化规律。

华北地区内,北京、河北和山西的农业水资源流量和存量耗用关系大致呈倒“U”形,水足迹深度和足迹广度同向增减,在居民节水意识加深和政策约束的情况下,经历了可持续程度降低到增强的变化阶段;由于农业可利用水量和农业生产水足迹的不同步波动变化,天津的水足迹深度和广度变化呈突变型;内蒙古农业水资源承载能力随时间变化,但均处于自然深度内。东北地区内,吉林和黑龙江的水足迹深度均处于自然深度内,资源承载能力随时间先减小后增大;辽宁的降水年际差异较大,水足迹深度和广度变化呈突变型。华东地区内,上海大致呈倒“U”形,水足迹深度处于减小趋势,可持续状态变

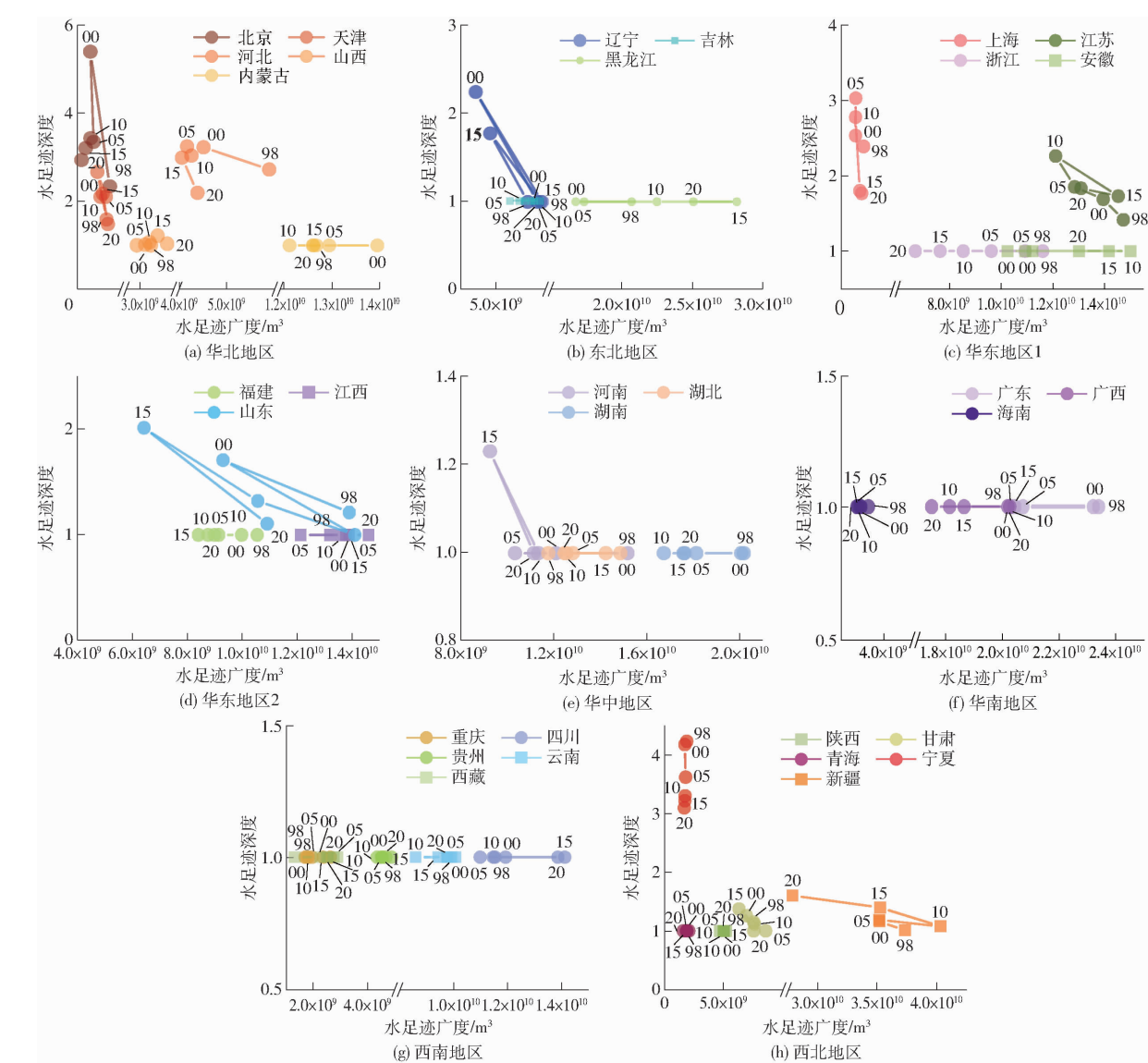


图 4 各省级行政区水足迹深度与广度关系
Fig. 4 Relationship between depth and size of water footprint in each province

好;受降水年型年际差异较大的影响,江苏和山东也呈突变型;浙江、安徽、江西和福建的水足迹深度均处于自然深度内,浙江和福建的水资源承载力逐年缩小,水资源流量可持续状态逐步变差。华中地区内,虽然农业用水占比逐年减小,但年际间降水年型差异较大,河南呈突变型;湖北和湖南的水足迹深度均处于自然深度内。华南地区内,广东、广西和海南的水足迹深度均处于自然深度内,但水足迹广度随时间均呈减小趋势,水资源承载能力逐步减弱。西南地区 5 个省级行政区的水足迹深度均处于自然深度内,重庆和四川的水足迹广度大致呈增大趋势。西北地区内,青海和陕西处于农业用水可持续状态,青海的水足迹广度呈减小趋势;甘肃年际间降水量差异大,农业水足迹随降水量变化较大,因此呈突变型;宁夏水足迹深度逐年减少,农业水资源利用可持续状态变好;新疆水足迹深度逐年增加,水足迹广度

大致呈减小趋势,可持续状态逐年变差。

2.2 区域农业水资源盈余和赤字状况

水资源盈余率和赤字率可以进一步反映水资源流量和存量的占用情况,与特定时间内特定区域可利用水资源流量和水资源占用量有关。中国农业水资源利用状况较好,水资源盈余率在 50% ~ 60% 之间,年均变化率 0.39%。区域农业水资源盈余率和赤字率时空变化如图 5 所示。

空间分布中,北京、天津、河北、上海、江苏、山东、甘肃、宁夏和新疆 9 个省级行政区处于水资源赤字状态,其中位于华北地区的 3 个省级行政区赤字状况较为严重。华东和西南地区农业水资源盈余率较高,其中浙江、福建、江西、重庆、四川和云南的年均盈余率达 60% 以上。中国湖泊最多的西藏和享有“中国水塔”之称的青海拥有年均 90% 以上的农业水资源盈余率。上海和江苏虽然拥有较为丰富的

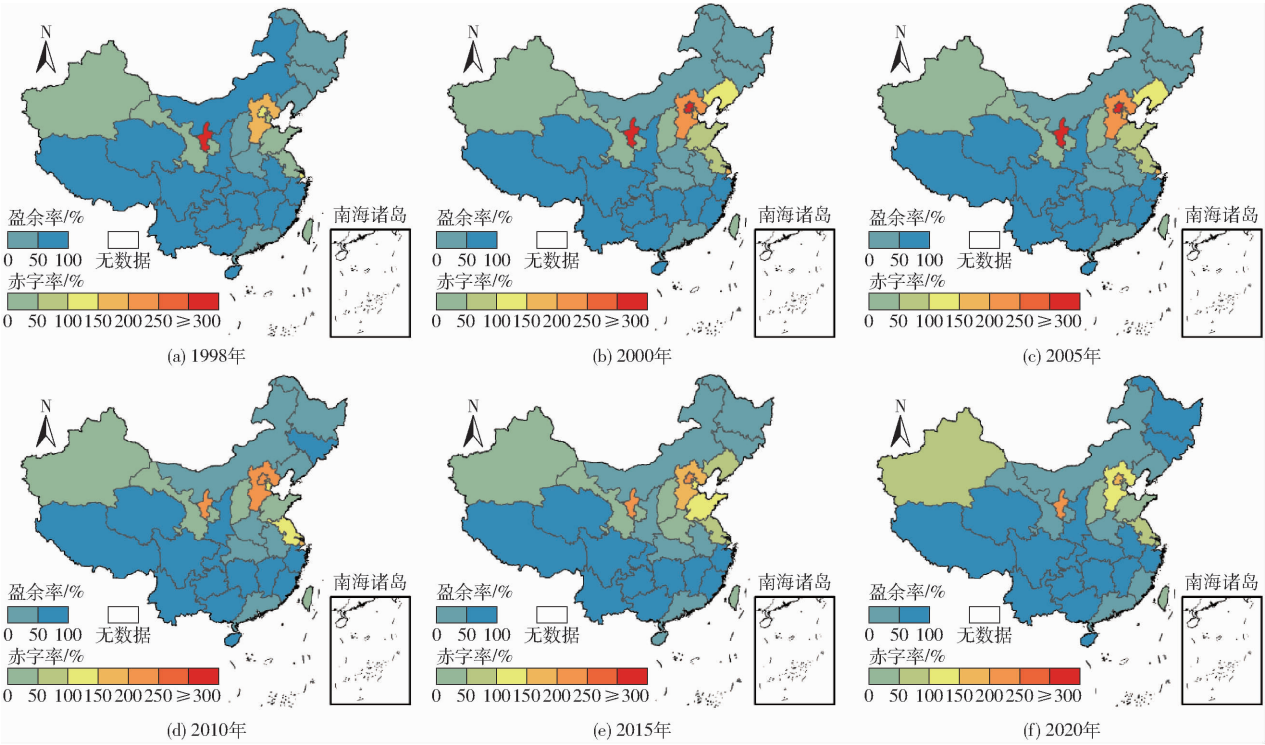


图5 区域农业水资源盈余率和赤字率时空变化

Fig. 5 Regional agricultural water surplus rates and deficit rates in time and space

过境水资源,但由于河流下游水质较差以及过境水受季节影响较大,农业水资源仍处于赤字状态。山东人口和产业较为密集,并且作为蔬菜和农业生产大省,农业水资源赤字情况也较为严重。

时间分布上,华北、华东和西北地区有明显变化。华北地区内,京津冀城市群的农业水资源赤字率在1999年陡降,后波动变化并趋于增加趋势,即不可持续程度逐渐降低。华东地区内,上海、江苏和福建年际间变化差异较大,无明显规律;安徽以2011年为界,水资源盈余率变化趋势为先减少再增加。西北地区内,宁夏是农业水资源赤字率最严重的区域,但随着时间变化,赤字率波动变化且缓慢减小,但在2020年农业水资源赤字率仍为209.7%,农业用水供需矛盾仍十分严重。新疆面积广阔,降水少,植被蒸散发量大,2020年新疆棉花产量占全国的87.3%,农业水资源赤字率不断增加,由1998年的0.89%增长至2020年的60.22%,农业用水供需矛盾逐步恶化。

2.3 农业用水与经济发展变化关系

农业水-经济类型划分结果如图6所示。中国农业水-经济关系的整体状况较好,2013—2020年连续7年为农业水-经济类型中最好的类型1,即农业生产总值增加,农业水-经济关系脱钩且处于环境可持续状态。农业水-经济类型划分结果如图6所示。

省级行政区尺度上,浙江农业水-经济关系最

好,研究时间内共17次达到类型1,与其农业用水占比相对较低,经济发展较快,灌溉效率较高有关;其次为福建、广东、广西和海南的14次,这些地区虽然农业用水占比均在50%以上,但灌溉水有效利用程度很高^[5]。北京、天津、河北、山西、辽宁、黑龙江、上海、江苏、山东和宁夏均出现类型6,即农业水-经济关系耦合且环境不可持续,为最差的农业水-经济类型。其中北京最为严重,虽然农业用水占比较低,但是较低的水资源承载能力和其他部门激烈的用水竞争关系,进一步压缩了农业可利用水资源量。按区域整合为华北地区整体农业水-经济关系较差,西北、华中、华东和东北地区部分农业水-经济关系较差。在时间变化上,2002—2003年、2006—2007年和2015—2016年这3个时间段内类型1出现的次数最多;1998—1999年、2014—2015年和2016—2017年3个时间段出现类型6的次数最多。北京和上海从2014年开始连续出现较差的农业水-经济关系状况,即农业用水可持续性降低,农业水资源承载力降低,农业生产总值也降低。

3 讨论

农业可持续用水对维持区域粮食安全和地区健康发展有着关键作用。区域农业用水可持续评价对进一步探讨作物种植结构调整与适宜灌溉规模确定等具有重要参考意义。本文研究结果表明,华北、华东和西北地区的农业用水可持续状况较差,西南和华

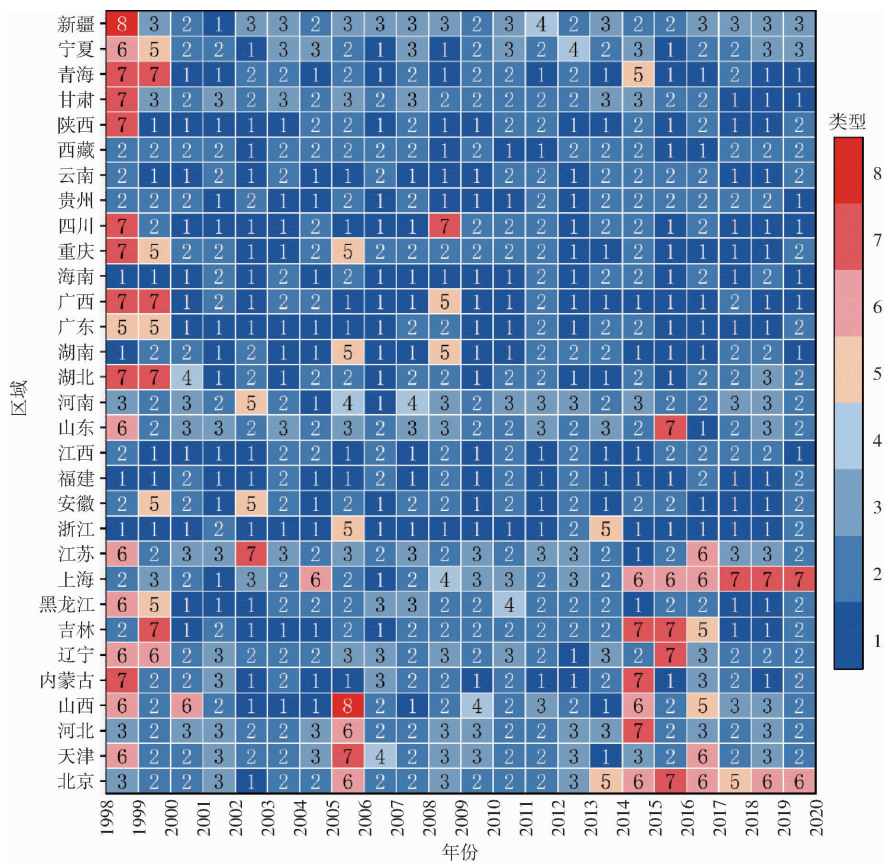


图 6 区域农业水-经济关系变化热点图

Fig. 6 Hotspot map of regional agricultural water – economic nexus changes

南地区状况较好,但这与中国的农业生产和相应的水资源配置有所矛盾。北方旱区是我国的粮食主产区,但由于气候条件,北方水资源压力大于南方。华北平原是中国重要的粮棉油生产基地,而北京、天津和河北的人均水资源量都远低于国际公认的水资源短缺阈值^[29]。西北地区以约占全国 10% 的水资源量生产了全国 12% 的粮食,棉花和瓜果的出口输出了大量的虚拟水^[30-31]。农业水-经济类型划分结果显示,华北地区整体脱钩状况较差,西北、华中、华东和东北地区局部脱钩状况较差。结合上述结果,提出以下可持续发展措施建议:①平衡区域水资源配置,调整作物种植结构,优化区域间农作物流通所带来的虚拟水贸易格局,减轻水资源分布不均所带来的局部农业生产用水不可持续状况。②发展农业节水技术和提高灌溉管理水平,提升灌溉水利用率和利用效率,以实现区域农业水资源利用与经济发展间的脱钩关系,形成环境与经济发展间的良性循环。

4 结论

(1) 中国农业用水整体上呈可持续状态,农业

年均水足迹广度为 $2.96 \times 10^{11} \text{ m}^3$ 。农业水资源利用不可持续省级行政区主要分布于华北、华东和西北地区,区域水资源承载能力较小,农业灌溉需水量较大。农业水足迹广度较大省级行政区主要分布于华南和西南地区,虽然农业灌溉需水量较大,但是水资源承载力较大,农业水资源利用可持续程度较好。

(2) 中国农业水资源盈余率保持在 50% ~ 60% 间,但由于中国水资源分布时空不均的特点,区域农业水资源盈亏差异和随时间的变化程度较大。空间分布上,西藏、青海、浙江、福建、江西、重庆、四川和云南 8 个省级行政区的农业水资源流量的盈余率较高,宁夏、北京、天津和上海农业水资源存量占用率较高,可持续性状况较差;时间分布上,华北、华东和西北地区的农业水资源盈亏状况有明显变化。

(3) 农业水-经济类型分析表明,华北地区整体农业水-经济关系较差,西北、华中、华东和东北地区部分农业水-经济关系较差。北京和上海在 2014 年后农业水-经济类型变差,农业生产与生态环境间关系恶化。

参 考 文 献

[1] 赵阳. 自然资本核算 推动可持续转型——基于各国政策实例研究[J]. 中国国土资源经济, 2022,35(2):4-11.

- ZHAO Yang. Natural capital accounting promotes sustainable transformation—based on the case study of national policies[J]. *Natural Resource Economics of China*, 2022, 35(2): 4–11. (in Chinese)
- [2] DALY H E. Beyond growth: the economics of sustainable development[M]. Boston: Beacon Press, 1996: 253.
- [3] 水利部. 中国水资源公报(2020)[M]. 北京: 水利水电出版社, 2021.
- [4] MEKONNEN M M, HOEKSTRA A Y. Sustainability of the blue water footprint of crops[J]. *Advances in Water Resources*, 2020, 143: 103679.
- [5] 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.
CAO Xinchun, REN Jie, WU Mengyang, et al. Assessing agricultural water use effect of China based on water footprint framework[J]. *Transactions of the CSAE*, 2018, 34(5): 1–8. (in Chinese)
- [6] 冯变变, 卓拉, 杨西, 等. 供应链视角小麦与初加工产品生产水足迹分析[J]. *农业机械学报*, 2021, 52(12): 358–367.
FENG Bianbian, ZHUO La, YANG Xi, et al. Water footprint analysis of wheat and derived products based on supply-chain [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2021, 52(12): 358–367. (in Chinese)
- [7] 卓拉, 王伟, 冯变变, 等. 黄河流域小麦生产水足迹量化与评价[J]. *农业机械学报*, 2019, 50(9): 264–271.
ZHUO La, WANG Wei, FENG Bianbian, et al. Water footprint accounting and evaluation for wheat production in Yellow River Basin[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2019, 50(9): 264–271. (in Chinese)
- [8] 刘巍, 李雨晴, 付强, 等. 黑龙江省粮食水足迹时空分布规律与影响因素分析[J]. *农业机械学报*, 2020, 51(8): 214–222.
LIU Wei, LI Yuqing, FU Qiang, et al. Spatial and temporal distributions of crop water footprint and its influence factors analysis in Heilongjiang Province[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2020, 51(8): 214–222. (in Chinese)
- [9] 冯东溥, 魏晓妹, 降亚楠. 宝鸡峡灌区小麦水足迹时空变化特征与归因分析[J]. *农业机械学报*, 2017, 48(12): 269–277.
FENG Dongpu, WEI Xiaomei, JIANG Ya'nan. Temporal and spatial variation characteristics and attribution analysis of wheat water footprint in Baojixia Irrigation Area, China[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2017, 48(12): 269–277. (in Chinese)
- [10] 吴楠, 郑雅莲, 栾雅琚, 等. 基于试验的稻田作物生产水足迹计算方法研究[J]. *灌溉排水学报*, 2017, 36(11): 19–24.
WU Nan, ZHENG Yalian, LUAN Yajun et al. Calculating water footprint of rice production based on experimental data[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2017, 36(11): 19–24. (in Chinese)
- [11] HOEKSTRA A Y. Human appropriation of natural capital: a comparison of ecological footprint and water footprint analysis[J]. *Ecological Economics*, 2009, 68(7): 1963–1974.
- [12] 周银双. 基于三维足迹家族对安徽省资源环境压力及其驱动力研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2019.
ZHOU Yinshuang. Research on resource and environment pressure and its driving forces in Anhui Province based on three-dimensional footprint family[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2019. (in Chinese)
- [13] 鲍燕妮. 基于三维足迹家族的资源环境承载力研究——以长三角生态绿色一体化发展示范区为例[D]. 上海: 上海师范大学, 2021.
BAO Yanni. Research on the resource and environment carrying capacity based on the three-dimensional footprint family[D]. Shanghai: Shanghai Normal University, 2021. (in Chinese)
- [14] FANG K, ZHANG Q, YU H, et al. Sustainability of the use of natural capital in a city: measuring the size and depth of urban ecological and water footprints[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 631–632: 476–484.
- [15] 熊鸿斌, 周银双. 基于三维水足迹-LMDI的安徽省水资源压力及驱动力分析[J]. *水土保持通报*, 2019, 39(5): 194–203.
XIONG Hongbin, ZHOU Yinshuang. An analysis of water resources pressure and driving forces in Anhui Province based on LMDI—three-dimensional water footprint model[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2019, 39(5): 194–203. (in Chinese)
- [16] FALKENMARK M, WANG-ERLANDSSON L, ROCKSTROM J. Understanding of water resilience in the Anthropocene[J]. *Journal of Hydrology X*, 2019, 2: 100009.
- [17] ROCKSTROM J, STEFFEN W, NOONE K, et al. A safe operating space for humanity[J]. *Nature*, 2009, 461(7263): 472–475.
- [18] STEFFEN W, RICHARDSON K, ROCKSTRÖM J, et al. Planetary boundaries: guiding human development on a changing planet[J]. *Science*, 2015, 347(6223): 1259855.
- [19] HUANG J, RIDOUTT B G, SUN Z, et al. Balancing food production within the planetary water boundary[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 253: 119900.
- [20] DONG H, FENG Z, YANG Y, et al. Sustainability assessment of critical natural capital: a case study of water resources in Qinghai Province, China[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2021, 286: 125532.
- [21] LI M, WIEDMANN T, LIU J, et al. Exploring consumption-based planetary boundary indicators: an absolute water footprinting assessment of Chinese provinces and cities[J]. *Water Research*, 2020, 184: 116163.
- [22] LUCAS P L, WILTING H C, HOF A F, et al. Allocating planetary boundaries to large economies: distributional consequences of alternative perspectives on distributive fairness[J]. *Global Environmental Change*, 2020, 60: 102017.
- [23] FANG K, HEIJUNGS R, De SNOO G R. Understanding the complementary linkages between environmental footprints and planetary boundaries in a footprint-boundary environmental sustainability assessment framework[J]. *Ecological Economics*, 2015, 114: 218–226.
- [24] FANG K, HEIJUNGS R, DUAN Z, et al. The environmental sustainability of nations: benchmarking the carbon, water and land footprints against allocated planetary boundaries[J]. *Sustainability*, 2015, 7(8): 11285–11305.
- [25] HOEKSTRA A Y, CHAPAGAIN A K, ALDAVA M M, et al. The water footprint assessment manual: setting the global standard[M]. Taylor and Francis, 2011.

[26] BOGARDI J J, FEKETE B M, VOROSMARTY C J. Planetary boundaries revisited: a view through the ‘water lens’[J]. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 2013, 5(6): 581–589.

[27] 张玲玲,车力,王宗志,等. 长江经济带水污染与经济脱钩关系演变及驱动因素研究[J]. *水利水电技术*, 2021, 52(12): 47–59.
ZHANG Lingling, CHE Li, WANG Zongzhi, et al. Study on evolution and driving factors of relationship between water pollution and economic decoupling in Yangtze River Economic Zone[J]. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 2021, 52(12): 47–59. (in Chinese)

[28] 阮仁良. 上海市水资源和水环境的可持续发展[J]. *水资源保护*, 2003, 19(1): 21–24.
RUAN Renliang. Sustainable development of water resources and water environment in Shanghai City[J]. *Water Resources Protection*, 2003, 19(1): 21–24. (in Chinese)

[29] 王勤勤,刘俊国,赵丹丹. 京津冀地区主要农作物生产水足迹研究[J]. *水资源保护*, 2018, 34(2): 22–27.
WANG Qinqin, LIU Junguo, ZHAO Dandan. Study on water footprint of main crop production in Jing-Jin-Ji Region[J]. *Water Resources Protection*, 2018, 34(2): 22–27. (in Chinese)

[30] 王玉宝,刘显,史利洁,等. 西北地区水资源与粮食安全可持续发展研究[J]. *中国工程科学*, 2019, 21(5): 38–44.
WANG Yubao, LIU Xian, SHI Lijie, et al. Sustainable development of water resources and food security in Northwest China [J]. *Strategic Study of CAE*, 2019, 21(5): 38–44. (in Chinese)

[31] 张家欣,邓铭江,李鹏,等. 虚拟水流视角下西北地区农业水资源安全格局与调控[J]. *中国工程科学*, 2022, 24(1): 131–140.
ZHANG Jiaxin, DENG Mingjiang, LI Peng, et al. Security pattern and regulation of agricultural water resources in Northwest China from the perspective of virtual water flow[J]. *Strategic Study of CAE*, 2022, 24(1): 131–140. (in Chinese)

(上接第 126 页)

[15] 罗锡文,李就好,朱余清,等. 耕作方式对砖红壤物理特性和含水率的影响[J]. *农业机械学报*, 2006, 37(12): 62–66.
LUO Xiwen, LI Jiuhao, ZHU Yuqing, et al. Effect of tillage methods on soil physical properties and moisture content of latosol [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2006, 37(12): 62–66. (in Chinese)

[16] 黄昌勇,徐建明. 土壤学[M]. 北京:中国农业出版社, 2010.

[17] 吕金庆,刘齐卉,杨德秋,等. 砂壤土条件下马铃薯中耕机关键部件设计与试验[J]. *农业机械学报*, 2021, 52(8): 27–39.
LÜ Jinqing, LIU Qihui, YANG Deqiu, et al. Design and test of key components of ploughshare potato field cultivator in sandy loam[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2021, 52(8): 27–39. (in Chinese)

[18] 刘海,张青松,廖宜涛,等. 小白菜复式播种机犁旋镇压驳岸型种床起垄装置研究[J]. *农业机械学报*, 2021, 52(11): 40–48, 77.
LIU Hai, ZHANG Qingsong, LIAO Yitao, et al. Design of plow-rotary and roll-forming revetment style seed bed ridging device of combined precision seeder for *Brassica chinensis* [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2021, 52(11): 40–48, 77. (in Chinese)

[19] 孙文峰,付天鹏,何跃,等. 水田带状复式整地机关键部件设计与试验[J]. *农业机械学报*, 2022, 53(1): 50–62.
SUN Wenfeng, FU Tianpeng, HE Yue, et al. Design and test on key components of strip compound ground preparation machine in paddy field[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2022, 53(1): 50–62. (in Chinese)

[20] 中国农业机械化科学研究院. 农业机械手册(上)[M]. 北京:中国农业机械出版社, 2007.

[21] 魏国梁,张青松,刘立超,等. 犁旋组合式油菜直播机扣垄装置设计与试验[J]. *农业机械学报*, 2020, 51(6): 38–46.
WEI Guoliang, ZHANG Qingsong, LIU Lichao, et al. Design and experiment of plowing and rotary tillage buckle device for rapeseed direct seeder[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2020, 51(6): 38–46. (in Chinese)

[22] 徐源. 三向可调式 V 型覆土镇压器设计及其防粘技术研究[D]. 哈尔滨:东北农业大学, 2018.
XU Yuan. Three-directional adjustable V-type soil-covered roller design and research on anti-sticky technology [D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2018. (in Chinese)

[23] 贾洪雷,王文君,庄健,等. 仿形弹性镇压辊设计与试验[J]. *农业机械学报*, 2015, 46(6): 28–34, 83.
JIA Honglei, WANG Wenjun, ZHUANG Jian, et al. Design and experiment of profiling elastic press roller[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2015, 46(6): 28–34, 83. (in Chinese)

[24] 赵淑红,刘宏俊,谭贺文,等. 丘陵地区双向仿形镇压装置设计与试验[J]. *农业机械学报*, 2017, 48(4): 82–89.
ZHAO Shuhong, LIU Hongjun, TAN Hewen, et al. Design and experiment of bidirectional profiling press device for hilly area [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2017, 48(4): 82–89. (in Chinese)

[25] 明向兰,陈海涛,魏志鹏. 低定量环保型水稻秸秆纤维地膜制造工艺参数优化[J]. *农业工程学报*, 2019, 35(19): 259–266.
MING Xianglan, CHEN Haitao, WEI Zhipeng. Optimization of technical parameters for making light-basis-weight and environment-friendly rice straw fiber film[J]. *Transactions of the CSAE*, 2019, 35(19): 259–266. (in Chinese)

[26] 张子浩. RGO-6 型水稻插秧机秸秆纤维地膜敷设装置设计[D]. 哈尔滨:东北农业大学, 2014.
ZHANG Zihao. Design of straw fiber mulching device on the RGO-6 type rice transplanter[D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2014. (in Chinese)

[27] GB 13735—2017 聚乙烯吹塑农用地面覆盖薄膜[S]. 2017.