

刘鑫钰,王 弋,贺 斌,等. 基于水、碳足迹的绿洲小麦生产环境影响特征及其脱钩关系——以新疆叶尔羌河流域莎车灌区为例[J]. 地球科学与环境学报, 2023, 45(4): 869-880.

LIU Xin-yu, WANG Yi, HE Bin, et al. Characteristics of Environmental Impact for Wheat Production and Their Decoupling Relationship in Oasis Irrigation Area Based on Water and Carbon Footprints—Taking Shache Irrigation District in Yarkant River Basin of Xinjiang, China as an Example[J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2023, 45(4): 869-880.

DOI: 10.19814/j.jese.2022.12072

· 环境与可持续发展专刊 ·

基于水、碳足迹的绿洲小麦生产环境影响特征 及其脱钩关系

——以新疆叶尔羌河流域莎车灌区为例

刘鑫钰¹, 王 弋^{1*}, 贺 斌², 罗平平^{3,4}, 曹成琳¹

(1. 华北电力大学 水利与水电工程学院, 北京 102206; 2. 广东省科学院生态环境与土壤研究所, 广东 广州 510650; 3. 长安大学 水利与环境学院, 陕西 西安 710054; 4. 长安大学 西安市流域空间水文的模拟监测与预警国际合作基地, 陕西 西安 710054)

摘 要: 农业是水资源消耗和温室气体排放的重要贡献部门, 农作物的不合理种植会对生态环境造成影响, 并威胁粮食安全。以新疆叶尔羌河流域莎车灌区为研究区, 考察了 1990~2020 年典型粮食作物小麦的生产情况; 基于水、碳足迹理论, 综合评价了小麦生产过程中的水资源消耗和温室气体排放特征, 并对二者的主要影响因素进行了相关性分析; 同时, 通过构建弹性脱钩模型, 探讨了小麦生产与环境影响变化之间的动态关系, 揭示了小麦生产中存在的环境问题。结果表明: 1990~2020 年, 莎车灌区小麦生产中水、碳足迹均整体表现为波动上升状态, 在 2008 年前后转入显著上升态势 ($P < 0.05$); 蓝水足迹在水足迹中的多年平均占比最大 (65%), 农资投入造成的碳足迹和农田 NO_2 排放引起的碳足迹多年平均占比相当, 但前者占比逐年增大; 政策和粮食需求驱动下的农业生产投入是影响小麦生产水、碳足迹变化的主要因素, 其中水、碳足迹增长与氮肥施用增多、种植面积扩大显著相关; 灌溉用电量虽然有控制水足迹增长的作用, 但导致碳足迹增长; 小麦产量与水、碳足迹的脱钩结果说明小麦生产存在造成高资源消耗和高环境成本的风险, 绿色发展面临挑战。因此, 为了实现区域小麦生产的可持续发展, 应提高资源利用效率以及优化生产管理模式, 以缓解小麦生产造成的环境胁迫。

关键词: 水足迹; 碳足迹; 小麦生产; 脱钩指数; 影响因素; 趋势分析; 莎车灌区; 新疆

中图分类号: S181; S271

文献标志码: A

文章编号: 1672-6561(2023)04-0869-12

Characteristics of Environmental Impact for Wheat Production and Their Decoupling Relationship in Oasis Irrigation Area Based on Water and Carbon Footprints

—Taking Shache Irrigation District in Yarkant River Basin of Xinjiang, China as an Example

LIU Xin-yu¹, WANG Yi^{1*}, HE Bin², LUO Ping-ping^{3,4}, CAO Cheng-lin¹

收稿日期: 2022-12-29; 修回日期: 2023-03-03

投稿网址: <http://jese.chd.edu.cn/>

基金项目: 国家自然科学基金项目 (42177065); 广东省科学院建设国内一流研究机构行动专项资金项目 (2020GDASYL-20200102013); 广东省科技计划项目 (2020B1111530001, 2019QN01L682, 2019B121201004)

作者简介: 刘鑫钰 (1997-), 女, 山东济南人, 工学硕士研究生, E-mail: liuxinyuimogen@foxmail.com.

* 通讯作者: 王 弋 (1977-), 女, 湖北武汉人, 教授, 博士研究生导师, 工学博士, E-mail: hywy02@foxmail.com.

(1. School of Water Resources and Hydropower Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206, China; 2. Institute of Eco-environmental and Soil Sciences, Guangdong Academy of Sciences, Guangzhou 510650, Guangdong, China; 3. School of Water and Environment, Chang'an University, Xi'an 710054, Shaanxi, China; 4. Xi'an Monitoring, Modelling and Early Warning of Watershed Spatial Hydrology International Science and Technology Cooperation Base, Chang'an University, Xi'an 710054, Shaanxi, China)

Abstract: Agriculture sector is an important contributor of global water consumption and greenhouse gas emissions, unreasonable crop cultivation system play negative impact on the ecosystem and food security. The wheat production development of Shache irrigation district in Yarkant river basin, Xinjiang from 1990 to 2020 was examined; the characteristics of water consumption and greenhouse gas emissions associated with wheat production were evaluated in terms of water and carbon footprints, and their influencing factors were investigated by correlation analysis method; furthermore, the dynamic relationship between wheat production and environmental impact were explored by means of Tapio decoupling model, so that the potential environmental risk during the wheat production was revealed. The results show that water and carbon footprints of wheat production in Shache irrigation district fluctuate and increase from 1990 to 2020, both of them turn into significant upward trends around 2008 ($P < 0.05$); blue water footprint, which means irrigation water consuming, accounts for the largest proportion of water footprint (65%); carbon footprints caused by agricultural inputs and farmland NO_2 emissions have the same multi-year average amount, but the former has grown over time; the main factors affecting the changes of water and carbon footprints are agricultural production inputs driven by policies and development demands; among them, the expansion of wheat planting area is significantly related to increase water and carbon footprints, and nitrogen fertilizer application is a major contributor for increasing grey water footprint and carbon footprint; although electricity for irrigation can control the growth of water footprint, but leads to the growth of carbon footprint; according to decoupling indexes between wheat yield and water and carbon footprints, the threat of high-resource consumption and high-environmental cost from wheat production still assignable, and green development faces challenges. Therefore, in order to realize the sustainable development of regional wheat production, it is necessary to improve the efficiency of resource utilization and concentrate on optimizing agricultural practices to alleviate the environmental stress caused by wheat production.

Key words: water footprint; carbon footprint; wheat production; decoupling index; influencing factor; trend analysis; Shache irrigation district; Xinjiang

0 引 言

气候变化背景下,水资源匮乏和粮食安全问题已成为全球关注的焦点^[1-2]。近 100 年来,全球地表温度上升约 1℃,全球用水量增长了 6 倍^[3];未来 20 年全球升温预计达到或超过 1.5℃,而由人类活动引起的升温约为 1.07℃^[4]。受气候变化影响,水资源危机也将进一步加剧,相关研究预测至 2050 年,全球将有超过一半的人口陷入水资源短缺的困境^[5-6]。农业是水资源消耗和温室气体排放的主要

贡献者之一,农业用水量占全球总用水量的 70%以上,世界粮食温室气体排放量约占全球人为温室气体排放总量的 34%^[7-9]。长期以来,农业发展建立在高资源消耗和高环境污染基础上,粮食生产加重了水资源压力并且加速了全球变暖进程^[10],而作物生态系统也将受到反馈循环的不良影响,进而对粮食安全形成威胁^[11]。因此,分析和规划粮食生产中的水资源消耗和温室气体排放,是实现水资源的科学可持续利用并控制温室效应持续加强的必要途径,也是实现我国“双碳”目标的重要环节。

为量化人类活动对环境的潜在影响,足迹理论被提出,并广泛应用于作物生产分析^[12]。其中,水足迹是指作物生产过程中的用水总量,包含作物生产对水量和水质的影响^[13],按水资源占用类型分为绿水足迹、蓝水足迹和灰水足迹^[14]。绿水足迹是作物生产可吸收利用的有效降水量,可反映有效降水和区域生态情况;蓝水足迹是指小麦生长发育所消耗的地表水和地下水资源总量,可作为人为灌溉耗水的表征;灰水足迹是指作物生产过程中产生的污染物在降水和径流的作用下,通过淋溶进入地表水后被稀释至无害所需要的水资源量^[15-16],可反映作物生产所致的水环境污染程度^[17]。碳足迹作为衡量产品生产或消费过程中温室气体排放总量和潜在压力的指标,常被用于核算作物生产整个生命周期的碳排放量,可用于评估农业活动对全球变暖的影响^[18]。目前,足迹理论在农业方面的研究大致集中在揭示其时空变化或对比区域之间的差异、评价资源利用效率和优化配置、分析生产影响因素和驱动力等方面,为保障农业绿色发展提供了理论支持^[19-27]。随着足迹理论研究的深入,对足迹理论的研究重点逐渐从单尺度向多尺度转变^[28],因此,将作物生产水足迹和碳足迹结合,可以多角度评估作物生产环境压力,更加综合、全面地考虑作物生产的环境影响,从系统的角度为优化作物生产发展提供思路。

“脱钩”起源于物理学,指两个或多个物理量之间的相互关系不再存在^[29]。近年来,“绿色经济”作为一种发展方式引起了全世界的关注,联合国环境规划署(United Nations Environment Programme, UNEP)在2011年的报告《将自然利用和环境影响与经济增长脱钩》中提出“将自然资源利用、环境影响与经济增长脱钩”^[30],脱钩理论因此被引入并扩展到环境经济领域,意在解决地球环境问题,提高人类福祉,实现绿色可持续发展目标^[31]。目前,脱钩分析已被广泛应用于经济增长与能源使用以及环境变化的相关研究中,旨在保持经济快速发展的同时,限制环境退化^[32-35]。在与农业相关的脱钩研究中, Li 等使用脱钩模型研究了四川成都农业经济与农业污染之间的关系^[36]; Chen 等研究了江西农业碳排放变化与经济增长之间的脱钩状态^[37]。这些研究对农业经济增长与生态资源占用之间的相互作用进行了间接评估,而缺乏对作物生产与环境影响变化的直接分析。将脱钩分析作为水足迹和碳足迹评估的补充,构建作物生产与水资源消耗、温室气体排

放的脱钩指数,可以完善作物生产环境影响评估体系,剖析作物生产发展现状和问题,为农业发展决策提供更加全面的科学依据,对区域践行科学长效治水理念、建立健全农业绿色低碳循环具有重要意义。

中国是农业大国,以世界上7%的耕地养活了22%的世界人口,是维护世界粮食安全的积极力量。新疆是我国西北地区战略屏障,农业是新疆的主导产业。叶尔羌河流域灌区是新疆典型的沙漠绿洲灌区,其粮食种植面积居新疆所有灌区首位。莎车灌区是叶尔羌河流域最大的子灌区,小麦是该灌区种植面积最广、产量最高的粮食作物。莎车灌区在行政上隶属于莎车县,该县是“一带一路”的重要城镇,也是新疆人口第一大县,该区域农业生产承载了保障粮食安全以及带动区域经济发展的重要责任。近年来受气候变化影响,西北干旱区近地表的变暖趋势影响了年降水量并加剧了冰川消融,未来可能使叶尔羌河流域洪水灾害发生的风险加大,进而对莎车灌区农业和生态产生负面影响^[38-40]。此外,人口增长和经济发展的牵引也使得莎车灌区农业生产的压力越来越大,对环境和水资源的占用难以避免,使干旱区本就脆弱的生态环境面临更加严峻的挑战。因此,科学分析莎车灌区小麦生产过程中水、碳足迹的变化趋势与影响因素,将为促进该区域农业生产的可持续发展提供重要的数据支持。

本文基于水足迹和碳足迹理论,分析了1990~2020年新疆叶尔羌河流域莎车灌区代表粮食作物小麦生产对水资源占用和温室气体排放两方面的影响,探讨影响水、碳足迹变化的影响因素和影响机制,并采用脱钩分析揭示小麦生产发展与环境变化之间的关系,诊断小麦生产发展过程中的环境问题,为实现区域小麦生产与环境的均衡发展提供有效的理论支持和科学依据。

1 研究区概况

研究区域为新疆叶尔羌河流域莎车绿洲(图1),纬度范围为37°27′00″N~39°00′15″N,经度范围为76°01′57″E~77°46′30″E,位于叶尔羌河流域中心位置,靠近叶尔羌河流域出山口,是新疆重要的灌溉农业生产基地。研究区农业类型为绿洲灌溉农业,农业用水主要水源是从叶尔羌河引水,灌溉面积为 $1.4 \times 10^5 \text{ hm}^2$ 。研究区南靠喀喇昆仑山,东邻塔克拉玛干沙漠,西连英吉沙黑孜戈壁和布古里沙漠,属于暖温带大陆性气候,降水稀少,蒸散强烈,多年平均降水量为47.6 mm,多年平均蒸发量为 $2.2 \times$

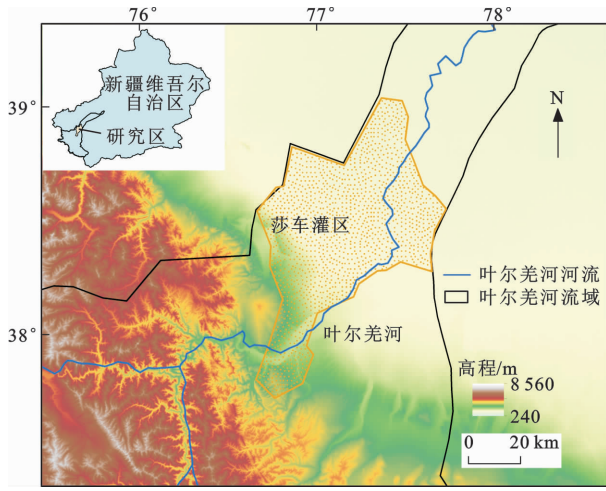


图 1 新疆叶尔羌河流域莎车灌区区位图

Fig. 1 Location of Shache Irrigation District in Yarkant River Basin of Xinjiang

10^4 mm, 生态环境脆弱, 水资源压力较大。

2 数据来源与分析方法

2.1 数据来源

本文以 1990~2020 年为研究时段, 所使用的莎车县月尺度平均降水量、日照时数、相对湿度、风速、气温等气象数据来源于中国气象数据网 (<http://data.cma.cn/>); 小麦生长周期、作物系数等作物数据来源于联合国粮食及农业组织 (Food and Agriculture Organization, FAO) 数据库 (<https://www.fao.org/land-water/databases-and-software/crop-information/wheat/en/>); 小麦生产相关统计数据来源于《新疆统计年鉴》。

2.2 分析方法

2.2.1 小麦生产水足迹

本文根据 Hoekstra 等提出的农作物生产水足迹核算方法^[41], 分别计算绿水足迹、蓝水足迹和灰水足迹, 对小麦生产的水足迹进行评估。其具体表达式为

$$F_{\text{water}} = F_{\text{water, green}} + F_{\text{water, blue}} + F_{\text{water, grey}} \quad (1)$$

$$F_{\text{water, green}} = 10 \times \sum \lg p_d E_{\text{green}} \times A \quad (2)$$

$$F_{\text{water, blue}} = 10 \times \sum \lg p_d E_{\text{blue}} \times A \quad (3)$$

$$F_{\text{water, grey}} = \frac{\alpha \cdot F_{\text{SN}}}{C_{\text{max}} - C_{\text{nat}}} \times A \quad (4)$$

$$E_{\text{green}} = \min(E_c, P_{\text{eff}}) \quad (5)$$

$$E_{\text{blue}} = \max(0, E_c - P_{\text{eff}}) \quad (6)$$

$$E_c = K_c E_0 \quad (7)$$

式中: F_{water} 为小麦总水足迹; $F_{\text{water, green}}$ 、 $F_{\text{water, blue}}$ 、 $F_{\text{water, grey}}$ 分别为小麦绿水足迹、蓝水足迹、灰水足迹;

E_{green} 为小麦绿水蒸散量; E_{blue} 为小麦蓝水蒸散量; $\lg p_d$ 为第 d 天小麦生育期长度; α 为氮元素的淋溶和径流损失率, 取值为 0.1^[42-43]; F_{SN} 为单位面积氮肥折纯施用量, 数据来源于《低碳发展及省级温室气体清单编制培训教材》^[44]; C_{max} 为水体对氮的最大可接受浓度, 采用《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002) 硝酸盐 (以氮元素计) 的标准浓度限^[45], 取值为 $0.01 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$; C_{nat} 为氮的自然本底浓度; 10 为 mm 和 $\text{m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$ 的单位转换系数; A 为种植面积; P_{eff} 为有效雨量, 采用美国农业部土壤保持局 (USDA Soil Conservation Service) 推荐的 USDA S. C. 法进行模拟; E_0 为参照作物蒸散量, 采用联合国粮食及农业组织推荐的 Penman-Monteith 公式核算; E_c 为小麦生育期内的蒸散量, 采用作物系数法修订; K_c 为作物系数; 该计算过程在联合国粮食及农业组织开发的 CROPWAT 8.0 模型中完成。

2.2.2 小麦生产碳足迹

小麦生产碳足迹是衡量小麦生产中产生的温室气体总量所造成潜在气候强迫的指标, 主要包括小麦生长过程中直接或间接引起的农田 NO_2 排放 (引入全球增温潜势 (Global Warming Potential, GWP) 转化为 CO_2 当量计) 以及农资投入相关的 CO_2 排放^[46]。具体表达式为

$$F_{\text{carbon}} = F_{\text{carbon, NO}_2} + F_{\text{carbon, input}} \quad (8)$$

$$F_{\text{carbon, NO}_2} = F_{\text{carbon, direct, NO}_2} + F_{\text{carbon, indirect, NO}_2} \times A \quad (9)$$

$$F_{\text{carbon, direct, NO}_2} = F_{\text{SN}} \times E_D \times \frac{44}{28} \times P_{\text{NO}_2} \quad (10)$$

$$F_{\text{carbon, indirect, NO}_2} = F_{\text{SN}} \times (R_L \times E_L + R_S \times E_S) \times \frac{44}{28} \times P_{\text{NO}_2} \quad (11)$$

$$F_{\text{carbon, input}} = \sum_{i=1}^n N_i \times E_{\text{carbon, } i} \times A \quad (12)$$

式中: F_{carbon} 为小麦总碳足迹; $F_{\text{carbon, NO}_2}$ 为农田 NO_2 排放引起的碳足迹; $F_{\text{carbon, input}}$ 为农业投入造成的碳足迹; $F_{\text{carbon, direct, NO}_2}$ 为单位面积土壤直接排放产生的碳足迹; $F_{\text{carbon, indirect, NO}_2}$ 为单位面积土壤间接排放产生的碳足迹; E_D 为氮投入引起土壤 NO_2 排放的排放因子, 取值 0.005 6; R_L 为氮淋溶和径流损失的比例, 取值 20%; E_L 为氮淋溶和径流间接引起的 NO_2 排放系数, 取值 0.007 5; R_S 为氮以 NH_3 形式的挥发率, 取值 10%; E_S 为氮挥发后因沉降而引起的 NO_2 间接排放系数, 取值 0.01; $\frac{44}{28}$ 为 N 与 NO_2 的转换系数; P_{NO_2} 为 NO_2 的 100 年全球增温潜势; N_i 为第 i 种农资单位面积投入量; $E_{\text{carbon, } i}$ 为第 i 种农资投

人的碳排放参数,详见表 1^[47-48]。

表 1 小麦生产中农资投入的碳排放参数

Table 1 Carbon Emission Parameters of Agricultural Inputs for Wheat Production

农资投入	碳排放参数
小麦种子	0.58 kg CO ₂ -eq kg ⁻¹
柴油	0.89 kg CO ₂ -eq kg ⁻¹
中国西北地区灌溉耗电	0.27 kg CO ₂ -eq MJ ⁻¹
氮肥	1.53 kg CO ₂ -eq kg ⁻¹
磷肥	1.63 kg CO ₂ -eq kg ⁻¹

2.2.3 Mann-Kendall 突变检验

Mann-Kendall 突变检验是世界气象组织(World Meteorological Organization, WMO)推荐并广泛应用于气候诊断与预测方面的非参数统计检验方法,具有样本无需服从某一分布、不受少数异常值干扰、适用于时间序列和计算便捷等优点^[49]。本文采用 Mann-Kendall 突变检验对小麦种植中产生的水、碳足迹进行突变检验与分析。

对于具有 n 个样本的时间序列 x ,构造一秩序列

$$S_k = \sum_{i=1}^k r_i \quad k = 2, 3, \dots, n \quad (13)$$

$$r_i = \begin{cases} 1 & x_i > x_j, j = 1, 2, \dots, i \\ 0 & x_i \leq x_j, j = 1, 2, \dots, i \end{cases} \quad (14)$$

在时间序列独立同分布的假定下定义统计量,则统计量 $U_{UF,k}$ 服从正态分布。其表达式为

$$U_{UF,k} = \frac{S_k - E(S_k)}{\sqrt{\text{Var}(S_k)}} \quad k = 1, 2, \dots, n \quad (15)$$

$$\begin{cases} E(S_k) = \frac{k(k-1)}{4} \\ \text{Var}(S_k) = \frac{k(k-1)(2k+5)}{72} \end{cases} \quad k = 2, 3, \dots, n \quad (16)$$

式中: $U_{UF,1} = 0$; $E(S_k)$ 、 $\text{Var}(S_k)$ 分别为序列 S_k 的均值和方差。

将时间序列 x 的逆序 x_n, x_{n-1}, \dots, x_1 重复上述计算过程,同时令统计量 $U_{UB,k} = -U_{UF,k}$ 。给定显著性水平 $\alpha = 0.05$,则对应临界值为 ± 1.96 ,将 $U_{UF,k}$ 和 $U_{UB,k}$ 绘制在同一图上。若 $U_{UF,k} > 0$,则表明序列为上升趋势,反之则为下降; $U_{UF,k}$ 在临界线以内变动,表明变化趋势不显著,反之则显著;若 $U_{UF,k}$ 与 $U_{UB,k}$ 在临界线以内出现交点,则该点为突变点,序列开始出现突变^[50]。

2.2.4 足迹与影响因素变化的相关性分析

本文利用 IBM SPSS Statistics 软件对各影响因素和水、碳足迹变化率进行 Spearman 非参数相关性分析。将变化率和相关分析法结合,可以探究

影响因素变化与足迹指标之间变化的相关性和同步性^[51]。Spearman 相关系数是秩相关系数的一种,适用于连续变量,是非参数相关性指标。Spearman 相关系数(R)具有不受两变量总体分布形态和样本容量限制的特点,同时适用于非线性数据。其基本原理和表达式为

$$R = 1 - \frac{6 \sum_{i=1}^n d_i^2}{n(n^2 - 1)} \quad (17)$$

式中: n 为数据量; d_i 为两个数据次序的差值。

对于 Spearman 相关系数强弱和显著性的检验,采用双尾显著性水平,本文样本数量为 30,查检验表即可检验显著性。

2.2.5 脱钩指数

脱钩分析是判断产业发展与资源消耗、环境变化是否同步的一种方法,并且通过脱钩指数的状态可以衡量产业发展是否可持续^[52]。本文选取产量和水、碳足迹作为分析指标,采用 Tapio 弹性脱钩模型构建小麦产量与水、碳足迹之间的脱钩指数并进行分析。Tapio 弹性脱钩模型能够克服基期选择造成的影响,可以动态反映作物生产与水资源消耗、温室气体排放之间的关系^[53]。其表达式为

$$D_{WF-Y} = \frac{\Delta F_{\text{water}}}{\Delta Y} = \frac{F_{\text{water},j}/F_{\text{water},j-1} - 1}{Y_j/Y_{j-1} - 1} \quad (18)$$

$$D_{CF-Y} = \frac{\Delta F_{\text{carbon}}}{\Delta Y} = \frac{F_{\text{carbon},i}/F_{\text{carbon},j-1} - 1}{Y_j/Y_{j-1} - 1} \quad (19)$$

式中: D_{WF-Y} 、 D_{CF-Y} 分别为小麦产量与水足迹、碳足迹的脱钩指数; ΔY 、 ΔF_{water} 和 ΔF_{carbon} 分别为小麦产量、水足迹和碳足迹在现期与基期之间的变化率; Y 为产量; j 为现期时间, $j-1$ 为基期时间,基于研究区实际情况,本文选取时间间隔为 5 年。

在脱钩分析中,稳定系数可以用来评估脱钩稳定性状态。该值越低,则脱钩波动性越低^[54]。其表达式为

$$S_D = \frac{1}{m-1} \sum_l^m \left| \frac{D_{l+1} - D_l}{D_l} \right| \quad (20)$$

式中: S_D 为稳定系数; D_{l+1} 和 D_l 表示后一阶段和前一阶段的脱钩指数; m 为脱钩指数的样本数。

结合前人研究与本文实际情况,将脱钩关系分为 6 类^[55-56],详见表 2。

3 结果分析

3.1 小麦生产水、碳足迹变化特征

1990~2020 年,新疆叶尔羌河流域莎车灌区小麦总产量由 1.31×10^8 kg 增长到 2.40×10^8 kg,

表 2 小麦产量与水、碳足迹脱钩关系的划分标准

Table 2 Division Criteria of Decoupling Relationship of Wheat Yield from Water and Carbon Footprints

脱钩状态	水足迹与小麦产量之间的关系	碳足迹与小麦产量之间的关系	状态说明
强脱钩	$\Delta F_{\text{water}} \leq 0, \Delta Y > 0, D_{\text{WF-Y}} \leq 0$	$\Delta F_{\text{carbon}} \leq 0, \Delta Y > 0, D_{\text{CF-Y}} \leq 0$	小麦产量增长, 对环境的影响减小
弱脱钩	$\Delta F_{\text{water}} > 0, \Delta Y > 0, 0 < D_{\text{WF-Y}} < 1$	$\Delta F_{\text{carbon}} > 0, \Delta Y > 0, 0 < D_{\text{CF-Y}} < 1$	小麦产量增长, 对环境的影响增大, 但产量增速更快
扩张连接	$\Delta F_{\text{water}} > 0, \Delta Y > 0, D_{\text{WF-Y}} \geq 1$	$\Delta F_{\text{carbon}} > 0, \Delta Y > 0, D_{\text{CF-Y}} \geq 1$	小麦产量与对环境的影响联动增长, 增速同步
衰退连接	$\Delta F_{\text{water}} < 0, \Delta Y < 0, D_{\text{WF-Y}} \geq 1$	$\Delta F_{\text{carbon}} < 0, \Delta Y < 0, D_{\text{CF-Y}} \geq 1$	小麦产量与对环境的影响联动减少, 减速同步
弱耦合	$\Delta F_{\text{water}} < 0, \Delta Y < 0, 0 < D_{\text{WF-Y}} < 1$	$\Delta F_{\text{carbon}} < 0, \Delta Y < 0, 0 < D_{\text{CF-Y}} < 1$	小麦产量减少, 对环境的影响减小, 但小麦产量减小速度更快
强耦合	$\Delta F_{\text{water}} \geq 0, \Delta Y < 0, D_{\text{WF-Y}} \leq 0$	$\Delta F_{\text{carbon}} \geq 0, \Delta Y < 0, D_{\text{CF-Y}} \leq 0$	小麦产量减少, 对环境的影响增大

2020 年比 1990 年增长了 83%, 其中 2016 年达到峰值(3.02×10^8 kg)[图 2(a)], 此后略有下降。水足迹和碳足迹整体表现为波动增长[图 2(b)、(c)], 但变化趋势不一致, 说明小麦生产对水资源消耗和温室气体排放有不同程度的影响。水足迹由 1990 年的 3.29×10^8 m³ 增长至 2020 年的 4.50×10^8 m³, 最低值和最高值分别出现在 1999 年(2.90×10^8 m³)和 2016 年(5.30×10^8 m³); 碳足迹由 1990 年的 0.61×10^8 kg CO₂-eq 增长至 2020 年的 1.54×10^8 kg CO₂-eq, 最高值出现在 2016 年(1.78×10^8 kg CO₂-eq)。线性拟合结果显示, 研究期内小麦产量、水足迹和碳足迹三者均呈上升态势。

本文进一步对小麦生产水足迹和碳足迹总量进行了 Mann-Kendall 突变检验分析。由图 3(a)可知: 2001 年之前, 水足迹呈波动变化, 此后转入上升状态; 2007 年左右发生突变, 上升速率加快, 此后于 2008 年左右进入显著上升时期($P < 0.05$)。碳足迹则一直表现为上升态势[图 3(b)], 并在 2008 年前后上升态势由不显著转为显著($P < 0.05$)。20 世纪 90 年代, 南疆地区兴修水利设施和变革土地经营制度共同促进了农业发展, 但同时由于区域经济和技术水平等客观条件的限制, 农业生产水平较低且发展较缓慢; 进入 21 世纪, 国家开始实行农业税减免、粮食生产补贴等惠农政策, 为莎车灌区农业经济发展注入了新的动力; 2005 年以后, 中央推进发展现代农业, 强化农业基础地位, 小麦生产的战略地位上升, 然而在追求增产的同时, 其对环境的负面影响也日益明显。

3.2 小麦生产水、碳足迹构成结构特征

图 4(a)展示了水足迹和碳足迹的构成情况。水足迹的主要贡献成分为表征灌溉用水量的蓝水足迹, 在水足迹中多年平均占比达 65%, 其次为表征水污染的灰水足迹(占比为 33%), 而代表可供作物生长利用有效降水的绿水足迹占比仅为 2%。莎车

绿洲温带大陆性干旱气候的自然特征导致绿水资源十分稀缺, 小麦生长期供水主要依赖灌溉, 因此蓝水足迹较高而绿水足迹极低; 而灰水足迹约占 1/3, 表明灌区小麦生产造成了较为严重的非点源污染。

图 4(b)展示了碳足迹的构成和变化, 并详细分解了农业投入造成的碳足迹情况。农田 NO₂ 排放引起的碳足迹和农资投入造成的碳足迹多年平均占比均为 50%。但农资投入造成的碳足迹比重有逐渐增多的趋势: 1999~2009 年由 44% 增长至 50%, 特别是 2014~2020 年农资投入造成的碳足迹明显上升, 至 2020 年占比已达 63%。研究区推行大力发展粮食生产的政策, 促进了小麦生产规模和农资投入力度的增大, 使农资投入造成的碳足迹迅速增长。在农资投入造成的碳足迹中, 氮肥投入引起的碳排放量最多, 占比约为 42%。毫无疑问, 氮肥施用是研究区小麦生产水足迹和碳足迹的重要贡献成分; 其次灌溉用电所占比例约为 27.3%, 并且随着生产发展进程推移, 其占比逐渐增大, 小麦生产的能源消耗及其引起的温室气体排放有增多趋势。

3.3 水、碳足迹变化影响因素

基于前述研究结果和水、碳足迹的计算原理, 气候和农业生产投入是水足迹和碳足迹变化的主要影响因素。鉴于此, 本文从上述两方面选取 8 个指标分析其对作物生产水足迹和碳足迹变化的影响(表 3)。

在气候因素方面, 水足迹变化率、碳足迹变化率除与降雨量变化率、日照时数变化率成负相关关系外, 与其余各指标均表现为正相关关系。气候因素作用于小麦蒸散量变化来影响水足迹, 气温、风速和日照时数增长会加重农业干旱的程度, 降水量和相对湿度的增长则使农业干旱有所缓解。由于小麦属于耐旱型作物, 且莎车灌区小麦供水主要依靠引水灌溉, 所以气象因素对小麦生产环境影响较小。而受水分条件限制, 莎车灌区小麦生产需要更多的电

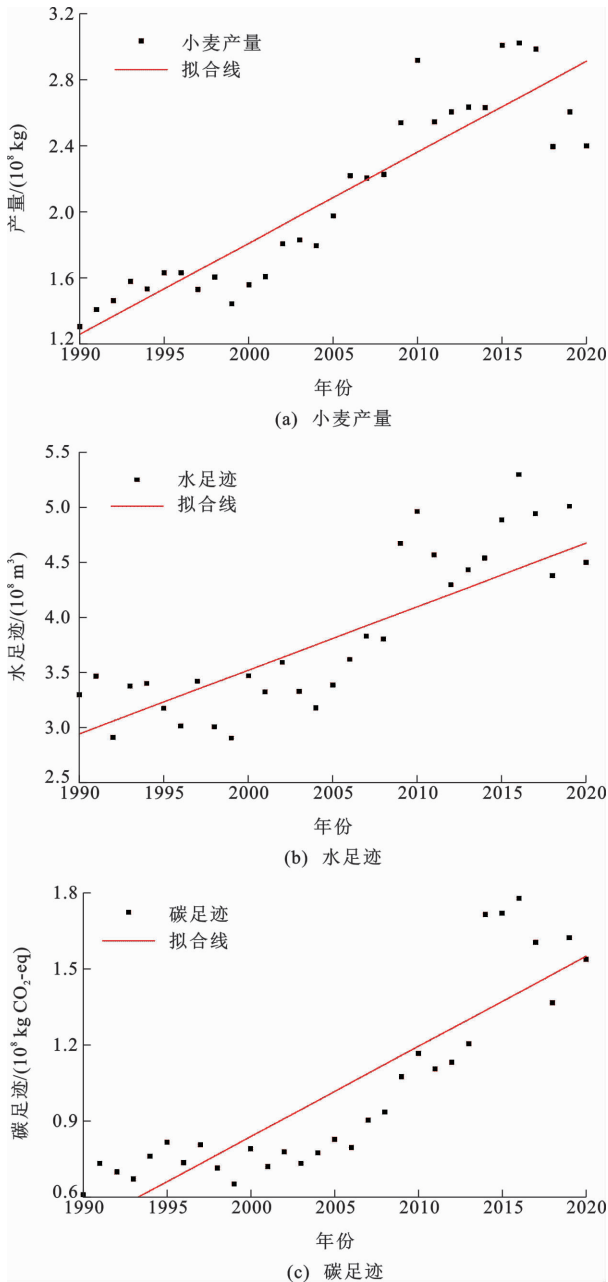


图 2 1990~2020 年小麦产量、水足迹和碳足迹变化
Fig. 2 Changes of Wheat Yield, Water Footprint and Carbon Footprint from 1990 to 2020

力用于灌溉,以及更多的肥料投入用于保持土壤肥力,进而使碳足迹增多。与水足迹变化率、碳足迹变化率相关性最高的指标分别是单位面积氮肥折纯施用量变化率、种植面积变化率和灌溉用电量变化率,均属于农业生产投入因素。其中,种植面积增大、氮肥施用量增多与小麦生产水足迹和碳足迹的增长均有显著相关关系,研究期内小麦生产种植规模整体呈扩张趋势;1990~2020 年小麦种植面积由 38 313 hm² 扩大到 45 830 hm²,种植面积最大达到 50 620 hm²(2019 年),导致小麦需水量和氮肥施用

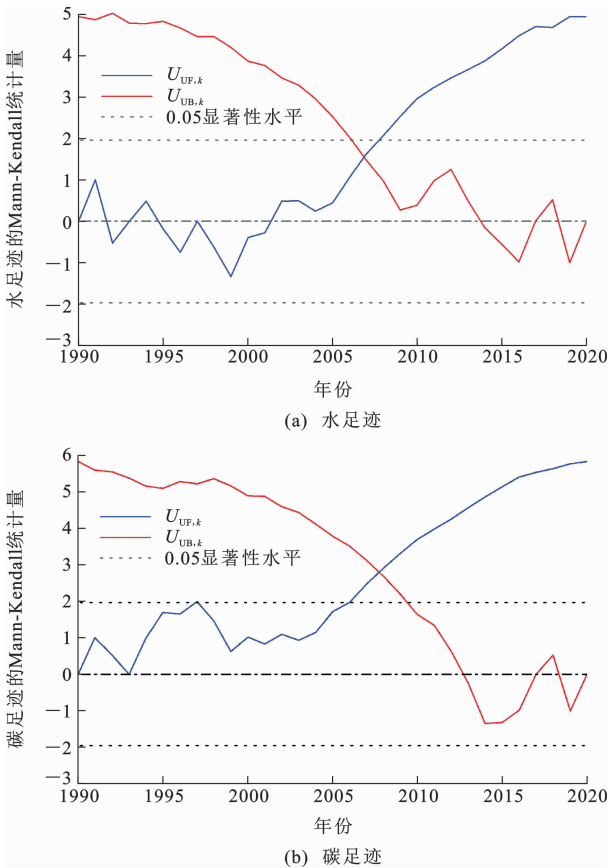


图 3 1990~2020 年小麦生产水、碳足迹的
Mann-Kendall 突变检验

Fig. 3 Mann-Kendall Test of Water and Carbon Footprints of Wheat Production from 1990 to 2020

表 3 小麦生产水、碳足迹变化率与影响因素
变化率之间的相关关系

Table 3 Correlations Between Water and Carbon Footprints, and Their Influencing Factors of Wheat Production

因素类型	相关分析指标	R_{WF}	R_{CF}
气候因素	$R_{\overline{T}}$	0.134	0.197
	$R_{\overline{P}}$	-0.051	-0.001
	$R_{\overline{H}}$	-0.227	-0.299
	$R_{\overline{U}}$	0.010	0.052
	$R_{\overline{S}}$	0.147	0.216
农业生产投入因素	R_A	0.718 **	0.441 *
	$R_{F_{SN}}$	0.749 **	0.831 **
	R_{EL}	-0.277	0.300

注: R 表示变化率;下标 \overline{T} 、 \overline{P} 、 \overline{H} 、 \overline{U} 、 \overline{S} 分别表示小麦生育期气温、降雨量、风速、相对湿度以及日照时数的平均值;下标 EL 、 WF 和 CF 分别表示灌溉用电量、水足迹、碳足迹; ** 表示在 0.01 显著性水平下相关; * 表示在 0.05 显著性水平下相关。

量增多,并直接引起水足迹和碳足迹增多。而灌溉用电量变化率与水足迹变化率成负相关关系,与碳足迹变化率成正相关关系,说明灌溉设施的投入有

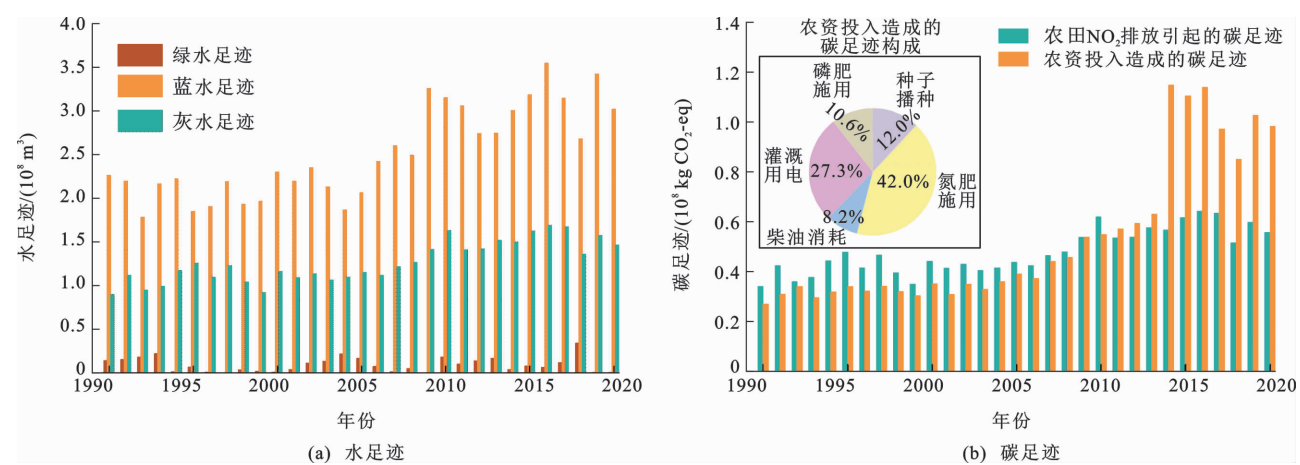


图 4 1990~2020 年小麦生产水、碳足迹构成及变化

Fig. 4 Structures and Changes of Water and Carbon Footprints of Wheat Production from 1990 to 2020

利于控制水足迹,但带来了更多的能源消耗和温室气体排放。

综上所述,农业生产投入与水足迹、碳足迹变化的相关性和同步性都较强,是小麦生产造成环境影响的最主要驱动因素。莎车灌区干旱的气候条件限制了小麦的生产力,是小麦生产造成环境影响的内 在因素。

3.4 小麦生产发展与环境影响的脱钩

产量是小麦生产发展状况的直接反映。构建小麦产量与水足迹、碳足迹的脱钩指数,对于揭示小麦生产存在的环境问题及是否具有可持续性有重要的指示意义(表 4)。小麦产量与水足迹之间以及小麦产量与碳足迹之间分别经历了“强脱钩→强耦合→强脱钩→弱脱钩→强脱钩→衰退连接”和“扩张连接→强耦合→弱脱钩→弱脱钩→扩张连接→弱耦合”的变化过程。在小麦产量与水资源影响变化的脱钩分析中,强脱钩间歇出现的次数最多,在此期间小麦产量增长而水资源占用量减少,是环境友好的发展模式;强耦合状态的出现反映了较高的水资源代价但小麦没有相应产量的增长,此时生产活动严重侵占生态安全,是最不可持续的状态;衰退连接出现时,小麦产量与水足迹几乎同步减少,属于联动变化状态,此时小麦产量发展与环境影响的变化关系密切。小麦产量与碳足迹变化的脱钩分析中,扩张连接、弱脱钩、弱耦合分别出现两次。扩张连接时,小麦生产发展与碳足迹联动增长;弱脱钩状态表示小麦产量提升是以温室气体排放增多作为代价,但由于小麦产量提升速率快于温室气体排放速率,该状态下的农业生产模式短期内尚可接受,但长此以往将会出现农业生产过度排放温室气体的问题;弱耦合时,温室气体排放情况有所好转,但其速率小于

小麦减产速率,仍旧对环境造成不利影响。

根据式(20)检验出小麦产量与水足迹、碳足迹的脱钩指数的稳定系数分别为 24.925 和 2.790,表明小麦生产发展与水足迹、碳足迹变化的脱钩指数波动性较大。政策的支持促使莎车灌区农业获得发展,然而增大开垦力度、扩张种植面积和兴修农业水利的措施也对环境产生了影响,同时缺乏系统性的调控与管理导致农资投入利用效率低,加之西北干旱区的环境和气候条件的限制,虽然短期内依靠化肥等农资品的高投入实现了种植产量的增长,但过于粗放的农业生产方式会导致生产与环境关系的失调,表现为脱钩状态缺乏稳定性。小麦生产发展与环境影响变化的脱钩结果表明:小麦生产对不同方面的环境影响变化程度不同;小麦增产未必带来更大的资源环境压力,而小麦减产也未必减少相应的环境问题,未来小麦生产可持续发展的风险与机遇并存。

4 讨 论

自 1990 年以来,小麦生产的水足迹和碳足迹呈现波动上升状态,小麦生产对环境的影响逐渐增加。而小麦产量与水资源消耗、温室气体排放的脱钩指数,反映了小麦生产过程中的高耗低效问题以及不可持续预警;但不可否认的是,小麦产量与水、碳足迹之间确实发生过脱钩,尽管脱钩的趋势并不明显,但消除脱钩障碍和实现农业绿色发展的机遇仍然存在。为此,需要采取应对措施以减轻小麦生产发展带来过度侵占环境资源的问题。

本文在计算研究区小麦生产水足迹时发现氮肥施用所致的灰水足迹在整体水足迹中的占比达 1/3,并且氮肥施用导致的直接和间接温室气体排放量

表 4 小麦产量与水足迹、碳足迹的脱钩关系

Table 4 Decoupling Relationship of Wheat Yield from Water and Carbon Footprints

年份范围	小麦产量与水足迹的脱钩关系				小麦产量与碳足迹的脱钩关系			
	ΔF_{water}	ΔY	$D_{\text{WF-Y}}$	脱钩等级	ΔF_{carbon}	ΔY	$D_{\text{CF-Y}}$	脱钩等级
1990~1995	-0.002	0.046	-0.037	强脱钩	0.065	0.046	1.415	扩张连接
1995~2000	0.025	-0.007	-3.756	强耦合	0.002	-0.007	-0.242	强耦合
2000~2005	-0.003	0.050	-0.060	强脱钩	0.011	0.050	0.229	弱脱钩
2005~2010	0.082	0.083	0.990	弱脱钩	0.073	0.083	0.882	弱脱钩
2010~2015	-0.001	0.010	-0.132	强脱钩	0.092	0.010	9.220	扩张连接
2015~2020	-0.011	-0.039	0.291	衰退连接	-0.015	-0.039	0.391	弱耦合

在研究区小麦生产碳足迹中的占比最大。因此,控制氮肥施用、优化肥料管理是降低区域水环境污染和碳足迹的必要措施。同时,水资源消耗和灌溉用电量分别是水足迹和碳足迹的主要贡献成分,故而提高小麦生产过程中水资源利用效率仍是干旱区绿洲农业发展的重点。而合理规划开垦面积和种植区域,促进小麦生产向优势产区集中,不仅能有效控制耕地面积扩张,也可以提高农资利用率和灌溉效率,并为实施轮作和休耕制度以恢复生态提供更大的可行性,进而保障小麦生产实现绿色可持续发展。

5 结 语

本文基于水足迹和碳足迹的理论与模型,综合评估了新疆叶尔羌河流域莎车灌区小麦生产造成的环境影响,通过相关性分析分别对影响水、碳足迹变化的主要因素及影响机理进行了阐释,并基于脱钩理论探究了小麦生产发展过程中的环境问题。

(1)1990~2020 年,莎车灌区小麦生产水足迹和碳足迹总体呈上升趋势,水足迹由 $3.29\times10^8\text{ m}^3$ 增长至 $4.50\times10^8\text{ m}^3$,碳足迹由 $0.61\times10^8\text{ kg CO}_2\text{-eq}$ 增长至 $1.54\times10^8\text{ kg CO}_2\text{-eq}$ 。Mann-Kendall 突变检验显示二者都在 2008 年前后转入显著上升期。从足迹的结构来看,小麦生产水足迹主要构成部分为蓝水足迹(占比为 65%),其次为灰水足迹(33%);农田 NO₂ 排放引起的碳足迹和农资投入造成的碳足迹各占碳足迹总量的 50%,并且农资投入造成的碳足迹有逐年增长的趋势。

(2)粮食需求和政策驱动是莎车灌区小麦生产发展的源动力,农业生产投入是小麦生产造成环境影响的最主要影响因素,其中气象因素是内在影响因素。干旱的气候条件限制使小麦生产发展主要依赖扩张种植规模和加大农资品投入力度,进而对环境造成负面影响。

(3)1990~2020 年,小麦产量与水足迹之间经

历了“强脱钩→强耦合→强脱钩→扩张连接→强脱钩→衰退连接”的变化过程,稳定系数为 24.925;小麦产量与碳足迹之间经历了“扩张连接→强耦合→弱脱钩→弱脱钩→扩张连接→弱耦合”的变化过程,稳定系数为 2.790。小麦产量与水、碳足迹的脱钩关系均不稳定。整体来看,小麦生产发展建立在较高的资源投入和环境成本的基础上,长期过度投入造成生态环境恶化,但脱钩状态的存在说明小麦生产仍具备可持续发展的潜力。

(4)莎车灌区小麦生产存在高耗低效的问题,过度的生态资源侵占和粗放的农业管理模式加重了水资源压力和温室效应。因此,建议优化作物生产方式,合理控制种植面积,提高资源利用效率,实现小麦生产与环境平衡发展,保障农业生产的长效机能。

参 考 文 献 :
References :

[1] LIU J G, FOLBERTH C, YANG H, et al. A Global and Spatially Explicit Assessment of Climate Change Impacts on Crop Production and Consumptive Water Use[J]. PLOS One, 2013, 8(2): e57750.

[2] AL-BAKRI J T, SALAHAT M, SULEIMAN A, et al. Impact of Climate and Land Use Changes on Water and Food Security in Jordan: Implications for Transcending “the Tragedy of the Commons”[J]. Sustainability, 2013, 5(2): 724-748.

[3] UNESCO. The United Nations World Water Development Report 2020: Water and Climate Change[M]. Paris: UNESCO, 2020.

[4] 孙 颖. 人类活动对气候系统的影响: 解读 IPCC 第六次评估报告第一工作组报告第三章[J]. 大气科学学报, 2021, 44(5): 654-657.

SUN Ying. Impact of Human Activities on Climate System: An Interpretation of Chapter III of WG I Report of IPCC AR6[J]. Transactions of Atmospheric Sciences, 2021, 44(5): 654-657.

[5] 金银雪. 全球变暖下的水资源危机[J]. 生态经济,

- 2020,36(6):5-8.
- JIN Yin-xue. Water Resources Crisis Under Global Warming[J]. *Ecological Economy*,2020,36(6):5-8.
- [6] VELDKAMP T E,WADA Y,AERTS J H,et al. Towards a Global Water Scarcity Risk Assessment Framework: Incorporation of Probability Distributions and Hydro-climatic Variability[J]. *Environmental Research Letters*,2016,11(2):24006.
- [7] KASHYAP D,AGARWAL T. Carbon Footprint and Water Footprint of Rice and Wheat Production in Punjab, India [J]. *Agricultural Systems*, 2021, 186: 102959.
- [8] CRIPPA M,SOLAZZO E,GUIZZARDI D,et al. Food Systems Are Responsible for a Third of Global Anthropogenic GHG Emissions[J]. *Nature Food*,2021,2(3):198-209.
- [9] CAO Y Y,CHAI L,YAN X L,et al. Drivers of the Growing Water, Carbon and Ecological Footprints of the Chinese Diet from 1961 to 2017[J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*,2020,17(5):1803.
- [10] QIN J X,DUAN W L,CHEN Y N,et al. Comprehensive Evaluation and Sustainable Development of Water-energy-food-ecology Systems in Central Asia[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2022, 157:112061.
- [11] HANJRA M A,QURESHI M E. Global Water Crisis and Future Food Security in an Era of Climate Change [J]. *Food Policy*,2010,35(5):365-377.
- [12] HOEKSTRA A Y,WIEDMANN T O. Humanity's Unsustainable Environmental Footprint[J]. *Science*, 2014,334:1114-1117.
- [13] HOEKSTRA A Y,HUNG P Q. Globalisation of Water Resources: International Virtual Water Flows in Relation to Crop Trade [J]. *Global Environmental Change*,2006,15(1):45-56.
- [14] HOEKSTRA A Y,CHAPAGAIN A K,MEKONNEN M M,et al. The Water Footprint Assessment Manual [R]. London:Earthscan,2011.
- [15] CHAPAGAIN A K,HOEKSTRA A Y,SAVENIJE H H G,et al. The Water Footprint of Cotton Consumption: An Assessment of the Impact of Worldwide Consumption of Cotton Products on the Water Resources in the Cotton Producing Countries[J]. *Ecological Economics*,2006,60(1):186-203.
- [16] 傅 春,陈毓迪,刘业忠,等. 江西省农田灰水足迹时空分析[J]. *农业环境科学学报*. 2022,41(7):1501-1508.
- FU Chun,CHEN Yu-di,LIU Ye-zhong,et al. Temporal and Spatial Analysis of Grey Water Footprint in Jiangxi Province Farmland[J]. *Journal of Agro-environment Science*,2022,41(7):1501-1508.
- [17] MEKONNEN M M,HOEKSTRA A Y. A Global and High-resolution Assessment of the Green, Blue and Grey Water Footprint of Wheat [J]. *Hydrology and Earth System Sciences*,2010,14(7):1259-1276.
- [18] LANDMAN W. Climate Change 2007: The Physical Science Basis [J]. *South African Geographical Journal*,2010,92(1):86-87.
- [19] 赵亚飞,李 强,侯献飞,等. 新疆棉花/花生间作碳足迹研究[J]. *花生学报*,2019,48(2):61-65.
- ZHAO Ya-fei,LI Qiang,HOU Xian-fei,et al. Study on Carbon Footprint of Cotton/Peanut Intercropping in Xinjiang [J]. *Journal of Peanut Science*, 2019, 48(2):61-65.
- [20] SHI C F,YUAN H,PANG Q H,et al. Research on the Decoupling of Water Resources Utilization and Agricultural Economic Development in Gansu Province from the Perspective of Water Footprint[J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*,2020,17(16):5758.
- [21] LONG A H,YU J W,DENG X Y,et al. Understanding the Spatial-temporal Changes of Oasis Farmland in the Tarim River Basin from the Perspective of Agricultural Water Footprint [J]. *Water*, 2021, 13(5): 696.
- [22] 李 曼,何巧凤,刘焕才. 疏勒河流域中下游地区主要粮食作物生产水足迹变化及影响因素分析[J]. *节水灌溉*,2020(9):94-99,105.
- LI Man,HE Qiao-feng,LIU Huan-cai. Analysis of Water Footprint Changes and Influencing Factors of Main Grain Crops in the Middle and Lower Reaches of the Shule River Basin[J]. *Water Saving Irrigation*, 2020(9):94-99,105.
- [23] NA R S,NA L,DU H B,et al. Vegetation Greenness Variations and Response to Climate Change in the Arid and Semi-arid Transition Zone of the Mongolian Plateau During 1982—2015 [J]. *Remote Sensing*, 2021,13(20):4066.
- [24] MEHLA M K. Regional Water Footprint Assessment for a Semi-arid Basin in India [J]. *PeerJ*, 2022, 10: e14207.
- [25] HOSSAIN I,IMTEAZ M A,KHASTAGIR A. Water Footprint: Applying the Water Footprint Assessment Method to Australian Agriculture [J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*,2021,101(10):4090-

- 4098.
- [26] LI M, LIU S, SUN Y, et al. Agriculture and Animal Husbandry Increased Carbon Footprint on the Qinghai-Tibet Plateau During Past Three Decades [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2021, 278: 123963.
- [27] 楚天舒, 赖世宣, 韩鲁佳, 等. 采用碳水足迹评价中国与哈萨克斯坦大豆机械化生产模式[J]. *农业工程学报*, 2021, 37(3): 312-319.
- CHU Tian-shu, LAI Shi-xuan, HAN Lu-jia, et al. Evaluation of Soybean Mechanization Production Mode in China and Kazakhstan Using Carbon and Water Footprint[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2021, 37(3): 312-319.
- [28] GALLI A, WIEDMANN T, ERCIN E, et al. Integrating Ecological, Carbon and Water Footprint into a "Footprint Family" of Indicators: Definition and Role in Tracking Human Pressure on the Planet[J]. *Ecological Indicators*, 2012, 16: 100-112.
- [29] ZHANG Y, YANG Q S. Decoupling Agricultural Water Consumption and Environmental Impact from Crop Production Based on the Water Footprint Method: A Case Study for the Heilongjiang Land Reclamation Area, China[J]. *Ecological Indicators*, 2014, 43: 29-35.
- [30] UNEP. Decoupling Natural Resource Use and Environmental Impacts from Economic Growth[R]. Nairobi: UNEP, 2011.
- [31] WIEDENHOFER D, VIRAG D, KALT G, et al. A Systematic Review of the Evidence on Decoupling of GDP, Resource Use and GHG Emissions, Part I: Bibliometric and Conceptual Mapping [J]. *Environmental Research Letters*, 2020, 15(6): 63002.
- [32] WANG Q, ZHAO M M, LI R R. Decoupling Sectoral Economic Output from Carbon Emissions on City Level: A Comparative Study of Beijing and Shanghai, China[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019, 209: 126-133.
- [33] 王娜, 春喜, 周海军, 等. 干旱区水资源利用与经济发展关系研究: 以鄂尔多斯市为例[J]. *节水灌溉*, 2020(6): 108-113.
- WANG Na, CHUN Xi, ZHOU Hai-jun, et al. Study on the Relationship Between Water Resources Utilization and Economic Development in Arid Areas: A Case Study of Ordos City[J]. *Water Saving Irrigation*, 2020(6): 108-113.
- [34] 侯爱冰, 李长春, 聂龑, 等. 甘肃省水资源利用与经济增长的脱钩效应及驱动因素分析[J]. *水利水电技术*, 2022, 53(5): 55-64.
- HOU Yuan-bing, LI Chang-chun, NIE Yan, et al. Analysis on Decoupling Effect and Driving Factors Between Water Resources Utilization and Economic Growth in Gansu Province[J]. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 2022, 53(5): 55-64.
- [35] 韩文艳, 熊永兰. 科技大国能源消费碳排放与经济增长脱钩关系及驱动因素研究[J]. *生态经济*, 2022, 38(12): 13-22.
- HAN Wen-yan, XIONG Yong-lan. Research on the Decoupling Relationship and Driving Factors Between Energy Consumption Carbon Emission and Economic Growth in Scientific and Technological Power [J]. *Ecological Economy*, 2022, 38(12): 13-22.
- [36] LI S P, GONG Q X, YANG S L. Analysis of the Agricultural Economy and Agricultural Pollution Using the Decoupling Index in Chengdu, China[J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2019, 16(21): 4233.
- [37] CHEN J F, JIA J S, LIU C Y, et al. Decoupling Analysis of the Carbon Emissions' Change and the Economic Growth in Jiangxi's Agricultural Sector [J]. *E3S Web of Conferences*, 2021, 228: 01005.
- [38] WANG S T, CAO Z, LUO P P, et al. Spatiotemporal Variations and Climatological Trends in Precipitation Indices in Shaanxi Province, China[J]. *Atmosphere*, 2022, 13(5): 744.
- [39] 纪昌明, 曹成琳, 王弋. 基于水系连通的开都河生态需水及供水量分析[J]. *生态学杂志*, 2021, 40(3): 835-843.
- JI Chang-ming, CAO Cheng-lin, WANG Yi. Analysis on Ecological Water Demand and Supply of Kaidu River Based on Water System Connection[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2021, 40(3): 835-843.
- [40] ZHU Y H, LUO P P, ZHANG S, et al. Spatiotemporal Analysis of Hydrological Variations and Their Impacts on Vegetation in Semiarid Areas from Multiple Satellite Data [J]. *Remote Sensing*, 2020, 12(24): 4177.
- [41] HOEKSTRA A Y. Water Scarcity in the Zambezi Basin in the Long-term Future: A Risk Assessment[J]. *Integrated Assessment*, 2003, 4(3): 185-204.
- [42] WANG Q, LIU Y Y, TONG L J, et al. Rescaled Statistics and Wavelet Analysis on Agricultural Drought Disaster Periodic Fluctuations in China from 1950 to 2016[J]. *Sustainability*, 2018, 10(9): 3257.
- [43] ASIBI A E, YIN W, HU F L, et al. Optimized Nitrogen Rate, Plant Density, and Irrigation Level Reduced Ammonia Emission and Nitrate Leaching on Maize

Farmland in the Oasis Area of China[J]. PeerJ, 2022, 10: e12762.

[44] 国家应对气候变化战略研究和国际合作中心. 低碳发展及省级温室气体清单编制培训教材[R]. 北京: 国家发展和改革委员会应对气候变化司, 2013.

National Center for Climate Change Strategy and International Cooperation. Low-carbon Development and Provincial Greenhouse Gas Inventory Training Materials[R]. Beijing: Climate Change Department of the National Development and Reform Commission, 2013.

[45] GB 3838—2002, 地表水环境质量标准[S].

GB 3838—2002, Environmental Quality Standards for Surface Water[S].

[46] 龙 洁. 基于 LCA 的北京市农作物环境足迹集成及其影响评价[D]. 北京: 北京林业大学, 2020.

LONG Jie. Integration of Environmental Footprints and Its Impact Analysis of Beijing Crops Based on Life Cycle Assessment [D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2020.

[47] 王钰乔, 濮 超, 赵 鑫, 等. 中国小麦、玉米碳足迹历史动态及未来趋势[J]. 资源科学, 2018, 40(9): 1800-1811.

WANG Yu-qiao, PU Chao, ZHAO Xin, et al. Historical Dynamics and Future Trends of Carbon Footprint of Wheat and Maize in China[J]. Resources Science, 2018, 40(9): 1800-1811.

[48] HUANG W B, WU F Q, HAN W R, et al. Carbon Footprint of Cotton Production in China: Composition, Spatiotemporal Changes and Driving Factors[J]. Science of the Total Environment, 2022, 821: 153407.

[49] CHANG B, HE K N, LI R J, et al. Trends, Abrupt Changes, and Periodicity of Streamflow in Qinghai Province, the Northeastern Tibetan Plateau, China[J]. Polish Journal of Environmental Studies, 2018, 27(2): 545-555.

[50] 赵嘉阳. 中国 1960~2013 年气候变化时空特征、突变及未来趋势分析[D]. 福州: 福建农林大学, 2017.

ZHAO Jia-yang. Changes and Mutation in Temperature and Precipitation of China During 1960—2013 and Future Prediction[D]. Fuzhou: Fujian Agriculture and Forestry University, 2017.

[51] 张 沛, 龙爱华, 海 洋, 等. 1988~2015 年新疆农业用水时空变化与政策驱动研究: 基于农作物水足迹的统计分析[J]. 冰川冻土, 2021, 43(1): 242-253.

ZHANG Pei, LONG Ai-hua, HAI Yang, et al. Spatio-temporal Variations and Driving Forces of Agricultural Water Consumption in Xinjiang During 1988—2015: Based on Statistical Analysis of Crop Water Footprint[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2021, 43(1): 242-253.

[52] WANG Q, JIANG R, LI R R. Decoupling Analysis of Economic Growth from Water Use in City: A Case Study of Beijing, Shanghai, and Guangzhou of China [J]. Sustainable Cities and Society, 2018, 41: 86-94.

[53] 程婉婷. 辽宁省种植业水足迹经济脱钩及用水效率研究[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2020.

CHENG Wan-ting. Economic Decoupling and Water Use Efficiency Analysis Based on Water Footprint of Farming in Liaoning Province [D]. Shenyang: Shenyang Agricultural University, 2020.

[54] ZHEN W, QIN Q D, KUANG Y Q, et al. Investigating Low-carbon Crop Production in Guangdong Province, China(1993—2013): A Decoupling and Decomposition Analysis[J]. Journal of Cleaner Production, 2017, 146: 63-70.

[55] WANG L, LI L Q, CHENG K, et al. Comprehensive Evaluation of Environmental Footprints of Regional Crop Production: A Case Study of Chizhou City, China [J]. Ecological Economics, 2019, 164: 106360.

[56] 郭守前, 马珍珍. 中国经济增长与能源消耗脱钩关系研究[J]. 统计与决策. 2012(13): 133-135.

GUO Shou-qian, MA Zhen-zhen. Research on the Decoupling Relationship Between China's Economic Growth and Energy Consumption[J]. Statistics & Decision, 2012(13): 133-135.