

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.12.032

宝鸡峡灌区小麦水足迹时空变化特征与归因分析

冯东溥 魏晓妹 降亚楠

(西北农林科技大学水利与建筑工程学院, 陕西杨凌 712100)

摘要: 基于水足迹理论, 计算了实际耗水和施肥情况下宝鸡峡灌区小麦水足迹的各项指标, 分析了小麦水足迹各指标的时空变化特征, 利用对数平均迪氏指数分解法推导了总水足迹变化量分解公式, 细致定量了气候变化和人类活动因子对总水足迹变化的贡献。结果表明: 灌区小麦总水足迹 1994—2010 年均值为 6.73 亿 m^3 , Mann-Kendall 检验呈显著下降趋势, 年均变幅为 -0.17 亿 m^3/a , 水足迹结构由蓝水主导演变为灰水主导。单位产量的小麦生产水足迹、生产绿水、蓝水和灰水足迹多年平均值分别为 1.04、0.36、0.32、0.37 m^3/kg 。生产水足迹、生产绿水和蓝水足迹在灌区内从西向东呈递增趋势, 生产灰水足迹以兴平为中心向两侧递增。归因分析表明, 影响灌区小麦总水足迹变化的主导因子为人类活动, 其贡献率为 -113.57% , 而气候变化因子的贡献率仅为 13.57% 。人类活动因子中, 贡献率从大到小依次为灌溉定额 (-56.58%)、总种植面积 (-55.78%)、小麦种植比例 (-43.76%)、单位面积施氮量 (39.96%)、灌溉水有效利用系数 (2.59%)。

关键词: 小麦水足迹; 时空变化; 对数平均迪氏指数分解法; 耗水量; 宝鸡峡灌区

中图分类号: S273; TV213 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2017)12-0269-09

Temporal and Spatial Variation Characteristics and Attribution Analysis of Wheat Water Footprint in Baojixia Irrigation Area, China

FENG Dongpu WEI Xiaomei JIANG Ya'nan

(College of Water Resources and Architectural Engineering, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: Irrigation areas, as the major wheat producers in China, are facing water resources and environment problems which were led by huge water and fertilizer consumption in wheat production. To comprehensively assess these issues, the total water footprint (WFT) of wheat and production water footprint (WF) for per unit mass of wheat were calculated based on monthly meteorological and agricultural data from the Baojixia Irrigation Area (BIA) during the period of 1994—2010. Mann-Kendall trend test and the GIS based inverse distance weighted spatial interpolation were applied to analyze the temporal and spatial variations of wheat water footprint indices. Furthermore, the logarithmic mean Divisia index decomposition (LMDI) method was employed to quantify the contributions of driving factors for changes in WFT. The result showed that the average values of wheat WFT and WF were 673 million m^3 and 1.04 m^3/kg , while the green, blue and grey components accounted for 34.51%, 30.16% and 35.33%, respectively. The WFT and WF of wheat were declined significantly with slopes of -17 million m^3/a and -0.02 $\text{m}^3/(\text{kg}\cdot\text{a})$, respectively. The averages of WF and its green and blue components (1994—2010) rose gradually from southeast to northwest in BIA, however, the grey production water footprint was increased from center of the BIA to both sides. By LMDI method, the WFT in BIA was highly depended on human activities (-113.57%) rather than climate change (13.57%). The driving factors in order of importance were irrigation quota (-56.58%), total plant area (-55.78%), rate of wheat plant area (-43.76%), nitrogen fertilizer per hectare (39.96%), climate change (13.48%) and irrigation water utilization coefficient (2.59%). Excessive fertilization was common in BIA, which caused serious water pollution and huge amount of grey consumption.

收稿日期: 2017-08-03 修回日期: 2017-10-13

基金项目: 国家自然科学基金项目(51409219)、水利部公益性行业科研专项(201301016)、陕西水利科技计划项目(2011-07)、中央高校基本科研业务费专项资金项目(2014YB051)和西北农林科技大学博士科研启动经费项目(2013BSJJ099)

作者简介: 冯东溥(1986—),男,博士生,主要从事农业水资源研究,E-mail: xiphoes@126.com

通信作者: 魏晓妹(1957—),女,教授,博士生导师,主要从事水资源转化理论与调控技术研究,E-mail: weixiaomei57@tom.com

Meanwhile, the low irrigation water utilization coefficient in BIA led to more water wasted in conveyance. Based on the research, the practical suggestions for improving WFT and WF were fertilizer reduction and construction for high irrigation water utilization coefficient.

Key words: wheat water footprint; temporal and spatial variations; logarithmic mean Divisia index method; water consumption; Baojixia Irrigation Area

引言

随着气候变化和人类活动的加剧,水资源短缺、粮食安全和生态环境问题成为世界性难题^[1]。农业是用水大户,粮食生产是农业耗水的主要部分,2015年我国农业用水量为3 852.2亿m³,占总用水量的63.1%^[2]。与发达国家相比,我国灌溉技术比较落后,灌溉水分生产率不高^[3],水资源紧缺。为提高粮食产量,我国化肥施用量逐年增加^[4-5],造成农业面源污染,恶化了水质,加剧了水资源供需矛盾。传统水分生产效率评价指标^[6]只涉及粮食生产中蒸散发耗水,忽略了农业污染带来的生态环境耗水,而水足迹^[7]作为一种新兴指标,能够表征粮食生产过程中降水、输水、灌溉和施肥多个方面,是衡量国家和地区可持续发展的有效工具^[8]。粮食水足迹研究在全球尺度^[9]、国家尺度^[10]、省市尺度^[11]都有应用。我国灌区以49%的耕地面积生产了75%的粮食,是保障国家粮食安全的基石和用水大户,因此在灌区尺度研究粮食水足迹具有重要意义。

CAO等^[12]提出了考虑实际耗水的水足迹估算方法,并对全国443个灌区粮食生产水足迹进行评价。刘静等^[13]以水足迹为切入点分析了河套灌区粮食生产用水的时空演变特征。SUN等^[14]综合考虑了农业投入因素和气候变化对粮食生产水足迹的影响,为多因素影响下的水足迹归因分析提供了良好的范例。目前,灌区水足迹研究侧重于蓝水和绿水足迹,而对于灰水足迹涉及很少^[15],未能充分发挥水足迹的生态评价功能。此外,水足迹归因分析方法还不完善,以统计方法为主^[16],由于水足迹样本量普遍较小,长序列资料稀缺,因此统计类具有一定的局限性。对数平均迪氏指数分解法^[17](Logarithmic mean Divisia index, LMDI)是近年来能源学科提出的一种高效、准确、没有余差的分析方法,在水足迹分析中取得了一定成果^[18-19]。但目前的研究仅是将水足迹变化量分解为几个简单因素的贡献,缺乏对绿水、蓝水、灰水以及气候变化和人类活动贡献的细化。近几十年我国灌区粮食生产受气候变化和人类活动影响发生了很大变化,因此细致定量分析气候变化和人类活动各驱动因子的贡献,

既是揭示各驱动因子对灌区粮食水足迹影响机理的科学问题,也是有效应对新形势下粮食、水资源和环境挑战的现实需求。

本文以宝鸡峡灌区主要粮食作物冬小麦(以下简称小麦)为研究对象,基于灌区耗水、施肥和气象资料,考虑灰水部分,完整而系统地计算和分析小麦水足迹各指标及其时空变化特征;根据水足迹计算原理和LMDI法,推导气候变化(单位面积绿水消耗量)和人类活动(总种植面积、小麦种植比例、灌溉定额、灌溉水有效利用系数和单位面积施氮量)对作物总水足迹变化的贡献分解公式,旨在从机理上揭示区域作物总水足迹变化的客观规律,为定性定量分析作物水足迹影响因素,优化灌区水足迹提供有效的途径和科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区域和数据来源

宝鸡峡引渭灌区位于陕西省关中平原西部(106°51'~108°48'E, 34°9'~34°44'N),总面积23.55万hm²,有效灌溉面积19.43万hm²。灌区为温带大陆性季风气候半湿润易旱区,年平均气温13.1℃,无霜期220d,年平均降水量561.7mm。灌区经过40多年的运行与发展,已成为引渭河水为主、蓄引提结合灌溉的全国十大灌区之一,是陕西省粮食及经济作物的重要生产基地。

灌区1994—2010年的逐月气象资料来自陕西省气象局,农业灌溉和施肥资料来自灌区年报及陕西省统计年鉴^[20],小麦作物系数和生育期来自文献^[21],地理信息数据由灌区1:250 000地图数字化得到。

1.2 小麦水足迹计算

1.2.1 小麦总水足迹

作物总水足迹表示区域内一定时段生产某作物所消耗的淡水资源总量。作物生产水足迹指区域内生产单位产量该作物所消耗的水资源量。根据水足迹评价手册^[7],宝鸡峡灌区小麦总水足迹公式为

$$W_{FT} = W_F Y_{total} \quad (1)$$

$$\text{其中} \quad Y_{total} = YAR \quad (2)$$

式中 W_{FT} ——灌区小麦总水足迹, m³

W_F ——单位产量的小麦生产水足迹, m³/kg

Y_{total} ——灌区小麦总产量, kg

Y ——小麦单位面积产量, kg/hm²

A ——灌区总种植面积, hm²

R ——灌区小麦种植比例

小麦生产水足迹由生产绿水足迹、蓝水足迹和灰水足迹构成, 即

$$W_F = W_{Fgreen} + W_{Fblue} + W_{Fgray} \quad (3)$$

式中 W_{Fgreen} ——单位产量小麦生产绿水足迹, m³/kg

W_{Fblue} ——单位产量小麦生产蓝水足迹, m³/kg

W_{Fgray} ——单位产量小麦生产灰水足迹, m³/kg

1.2.2 小麦生产绿水足迹

绿水是作物生产过程中由降水渗入土壤而产生、可以被作物吸收利用的水分。生产绿水足迹是生产单位产量小麦所消耗的绿水, 可由式(4)计算, 其中月尺度的参考作物腾发量 ET_0 采用联合国粮农组织(FAO)推荐的 Penman - Monteith 公式^[22]计算, 由于涉及参数较多, 此处不再赘述。生产绿水足迹为

$$W_{Fgreen} = \frac{C_{WUgreen}}{Y} \quad (4)$$

其中 $C_{WUgreen} = 10 \sum_g \min(P_{eff}, ET_c)$ (5)

$$P_{eff} = \begin{cases} P_{month} (125 - 0.2P_{month}) / 125 & (P_{month} \leq 250 \text{ mm}) \\ 0.1P_{month} + 125 & (P_{month} > 250 \text{ mm}) \end{cases} \quad (6)$$

$$ET_c = K_c ET_0 \quad (7)$$

式中 $C_{WUgreen}$ ——小麦单位面积绿水消耗量, m³/hm²

P_{eff} ——小麦生育期内的有效降水量, mm

P_{month} ——小麦生育期内的月降水量, mm

g ——小麦生育期的月序数

ET_c ——小麦生育期内的作物需水量, mm

K_c ——小麦作物系数

1.2.3 小麦生产蓝水足迹

蓝水是作物生产过程中消耗的河流、地下含水层、水库和湖泊中储存的水分, 主要用于灌溉农业。CAO 等^[12]在考虑灌溉水在输水和灌水过程中损失的基础上, 从灌区总耗水量推算作物蓝水。由于宝鸡峡灌区地处关中平原缺水地区, 小麦一般采用非充分灌溉, 实际灌溉定额小于灌溉需水量, 因此, 灌区小麦生产蓝水足迹简化为

$$W_{Fblue} = \frac{C_{WUblue}}{Y} \quad (8)$$

其中 $C_{WUblue} = \frac{I_{WQ}}{\eta}$ (9)

式中 C_{WUblue} ——小麦单位面积蓝水消耗量, m³/hm²

η ——灌溉水有效利用系数

I_{WQ} ——净灌溉定额, m³/hm²

1.2.4 小麦生产灰水足迹

灰水为一定范围内稀释污染物以使环境水质满足允许的水质标准所需的水量。对于小麦灰水足迹一般核算施用量最大的氮肥, 因此将肥料折算为纯氮, 小麦施氮量参考陕西省统计年鉴^[20]和灌区问卷调查^[23]估算, 根据水足迹评价手册^[7]在缺乏详细资料情况下淋溶率推荐取 0.1, 水体自然本底质量浓度取 0 kg/m³, 氮的受纳水体最大允许质量浓度一般^[7,15]采用 EPA 标准^[24], 取 0.01 kg/m³。生产灰水足迹为

$$W_{Fgray} = \frac{C_{WUgray}}{Y} \quad (10)$$

其中 $C_{WUgray} = \frac{U_N \delta}{c_{max} - c_{nat}}$ (11)

式中 C_{WUgray} ——小麦单位面积灰水消耗量, m³/hm²

U_N ——折纯后的单位面积施氮量, kg/hm²

δ ——淋溶率

c_{max} ——受纳水体最大允许质量浓度, kg/m³

c_{nat} ——受纳水体自然本底质量浓度, kg/m³

1.3 水足迹时空变化特征分析

1.3.1 时程变化特征分析

由于传统统计分析方法对样本量和样本分布有一定要求, 本文采用适用性广泛、要求较少的非参数统计方法。采用 Sen 斜率^[25]分析序列的年均变幅, Mann - Kendall 趋势检验^[26-27], 分析序列变化趋势及显著性, 公式为

$$S = \sum_{k=1}^{n-1} \sum_{l=k+1}^n \text{sgn}(x_l - x_k) \quad (12)$$

$$V_{\alpha r}(S) = n(n-1)(2n+5)/18 \quad (13)$$

$$Z = \begin{cases} \frac{S-1}{\sqrt{V_{\alpha r}(S)}} & (S > 0) \\ 0 & (S = 0) \\ \frac{S+1}{\sqrt{V_{\alpha r}(S)}} & (S < 0) \end{cases} \quad (14)$$

其中 $\text{sgn}(x_l - x_k) = \begin{cases} 1 & (x_l > x_k) \\ 0 & (x_l = x_k) \\ -1 & (x_l < x_k) \end{cases}$ (15)

式中 n ——序列长度

x_k, x_l ——序列 x 的第 k 个和第 l 个元素 ($l > k$)

S ——指数为 0 的正态分布

$V_{\alpha r}$ ——方差

Z ——标准化检验统计量

如 Z 为正值, 表示序列呈上升趋势, 负值呈下降趋势; 当 $|Z|$ 大于等于 1.65、1.96 和 2.576 时, 表示序列在 P 为 0.1、0.05 和 0.01 的水平上变化显

著,否则变化趋势不显著。

1.3.2 空间变化特征分析

宝鸡峡灌区从西至东设置宝鸡总站、扶风总站、兴平总站、礼泉总站和咸阳总站,每个总站下辖多个分站来管理地理和行政上属于不同县区的农业和水利事务,同时也确保农业统计资料能够覆盖到全区。因此各总站的水足迹指标,对其覆盖区域具有很好的代表性。反距离权重法(Inverse distance weighted, IWD)空间差值利用幂参数与输出点的距离来控制已知点对内插值的影响,距离输出点越近则影响越大,适合点位较少时的空间分析。将各总站水足迹指标导入地理信息系统软件 ArcGIS 10.1 并利用空间分析工具包(Spatial analyst tools)实现反距离权重法空间差值。

1.3.3 水足迹变化的归因分析

LMDI 分解法将等于多个因子乘积的应变量,利用对数变形,最终转化为线性形式来分解应变量变化。目前的研究根据水足迹计算特点将总水足迹表示为几个因子的乘积形式直接代入 LMDI 分解法

$$W_{FT} = ARC_{WU} \quad (16)$$

$$\Delta W_{FT} = \Delta W_{FTA} + \Delta W_{FTR} + \Delta W_{FTC} \quad (17)$$

其中

$$\Delta W_{FTA} = \sum_i \left(\varphi(W_{FTi}(t), W_{FTi}(0)) \ln \frac{A_i(t)}{A_i(0)} \right) \quad (18)$$

$$\Delta W_{FTR} = \sum_i \left(\varphi(W_{FTi}(t), W_{FTi}(0)) \ln \frac{R_i(t)}{R_i(0)} \right) \quad (19)$$

$$\Delta W_{FTC} = \sum_i \left(\varphi(W_{FTi}(t), W_{FTi}(0)) \ln \frac{C_{WUi}(t)}{C_{WUi}(0)} \right) \quad (20)$$

$$\varphi(X_i(t), X_i(0)) =$$

$$\begin{cases} \frac{X_i(t) - X_i(0)}{\ln X_i(t) - \ln X_i(0)} & (X_i(t) \neq X_i(0)) \\ X_i(0) & (X_i(t) = X_i(0)) \end{cases} \quad (21)$$

式中 C_{WU} ——小麦单位面积总耗水量,由绿水、蓝水和灰水组成, m^3/hm^2

ΔW_{FT} ——灌区小麦总水足迹变化量, m^3

ΔW_{FTA} ——总种植面积对总水足迹变化的贡献量, m^3

ΔW_{FTR} ——小麦种植比例对总水足迹变化的贡献量, m^3

ΔW_{FTC} ——单位面积耗水量对总水足迹变化的贡献量, m^3

i ——分解地区的子区序数

t ——研究期内的时段序数

本文基于 LMDI 法和水足迹的特性,进一步将单位面积耗水量对总水足迹变化的贡献量分解为

$$\begin{aligned} \Delta W_{FTC} &= \Delta W_{FTC} \frac{\sum_i (\Delta C_{WUi,1} + \Delta C_{WUi,2} + \Delta C_{WUi,3})}{\Delta C_{WU}} = \\ &= \Delta W_{FTC} \frac{\sum_i \Delta C_{WUi,1}}{\Delta C_{WU}} + \Delta W_{FTC} \frac{\sum_i \Delta C_{WUi,2}}{\Delta C_{WU}} + \\ &= \Delta W_{FTC} \frac{\sum_i \Delta C_{WUi,3}}{\Delta C_{WU}} = \Delta W_{FTC,1} + \Delta W_{FTC,2} + \Delta W_{FTC,3} \end{aligned} \quad (22)$$

$$\begin{aligned} \Delta W_{FTC,j} &= \sum_i \left(\varphi(W_{FTi}(t), W_{FTi}(0)) \cdot \right. \\ &\quad \left. \ln \frac{C_{WUi}(t) C_{WUi,j}(t) - C_{WUi,j}(0)}{C_{WUi}(0) C_{WUi,j}(t) - C_{WUi,j}(0)} \right) \end{aligned} \quad (23)$$

式中 $\Delta W_{FTC,j}$ ——单位面积上第 j 种耗水量对总水足迹变化的贡献量, m^3

j ——序号数,取 1、2、3 时依次对应绿水、蓝水和灰水

由式(9)可知单位面积蓝水消耗量是灌溉定额和灌溉水有效利用系数的倒数相乘,采用 LMDI 法的思路将蓝水对总水足迹变化的贡献量继续分解为

$$\Delta W_{FTI} = \sum_i \left(\frac{\Delta W_{FTC,2}}{\ln C_{WUi,2}(t) - \ln C_{WUi,2}(0)} \ln \frac{I_{WQ}(t)}{I_{WQ}(0)} \right) \quad (24)$$

$$\Delta W_{FT\eta} = \Delta W_{FT\eta}^{-1} =$$

$$\sum_i \left(\frac{\Delta W_{FTC,2}}{\ln C_{WUi,2}(t) - \ln C_{WUi,2}(0)} \ln \frac{1/\eta(t)}{1/\eta(0)} \right) \quad (25)$$

将式(23)~(25)代入式(17)得出各因子对总水足迹变化贡献量

$$\begin{aligned} \Delta W_{FT} &= \Delta W_{FTA} + \Delta W_{FTR} + \Delta W_{FTC,1} + \\ &\quad \Delta W_{FTI} + \Delta W_{FT\eta} + \Delta W_{FTC,3} \end{aligned} \quad (26)$$

式中 ΔW_{FTI} ——净灌溉定额对总水足迹变化的贡献量, m^3

$\Delta W_{FT\eta}$ ——灌溉水有效利用系数对总水足迹变化的贡献量, m^3

在给定参数时,单位面积灰水消耗量只与单位面积施氮量有关,因此以单位面积灰水消耗量对总水足迹的贡献表征单位面积施氮量对总水足迹的贡献,以单位面积绿水消耗量的贡献表征气候变化对小麦总水足迹的贡献,以各因子的贡献量占总水足迹变化量绝对值的百分比作为对应因子的贡献率。

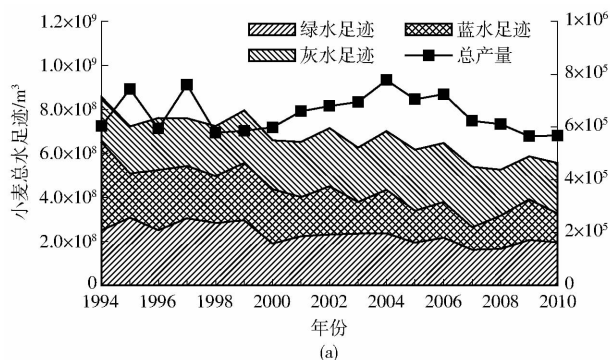
2 结果与分析

2.1 灌区小麦水足迹时空变化特征分析

2.1.1 小麦水足迹时程变化特征

灌区 1994—2010 年小麦总水足迹平均值为 6.73 亿 m^3 。由图 1a 可见,小麦总水足迹由 1994 年的最大值 8.56 亿 m^3 逐渐降低,1999 年出现较大幅度回升外,整体呈波动下降,最小值出现在 2008 年 (5.26 亿 m^3)。经 Mann-Kendall 检验 1994—2010 年小麦总水足迹 Z 值为 -4.08 ,表明小麦总水足迹呈显著下降趋势 ($P < 0.01$),年均变幅 -0.17 亿 m^3/a 。

在水足迹构成方面,绿水、蓝水和灰水足迹分别占 34.51%、30.16% 和 35.33%,多年平均值分别为 2.32、2.03、2.30 亿 m^3 。1994—2010 年间,绿水下



降趋势显著 ($P < 0.01$),年均变幅 -0.07 亿 m^3/a ; 蓝水 1994 年接近 4 亿 m^3 ,占总水足迹的 46.69%,之后显著减少 ($P < 0.01$) 到 2010 年的 1.31 亿 m^3 ,仅占 23.48%;灰水呈上升趋势 ($P < 0.1$),年均变幅 0.04 亿 m^3/a 。灌区 1994—2010 年小麦总产量平均值为 65.16 万 t, Z 值为 -0.29 ,总体下降趋势不显著,但在图 1a 中可见,1998—2004 年总产量显著上升, Mann-Kendall 检验 $P < 0.01$,2004 年之后出现连续阶梯式下降 ($P < 0.1$)。与 1994 年相比,2010 年灌区总水足迹减少了 35%,而相应总产量仅减小了 5.9%,从蓝水比例减少到灰水增加,可以明显看到灌区总水足迹的结构变化,这既是渭河径流逐年减少和地下水超采造成的水资源供需矛盾加剧所致,也有农民水肥投入和生产水平提高的原因。

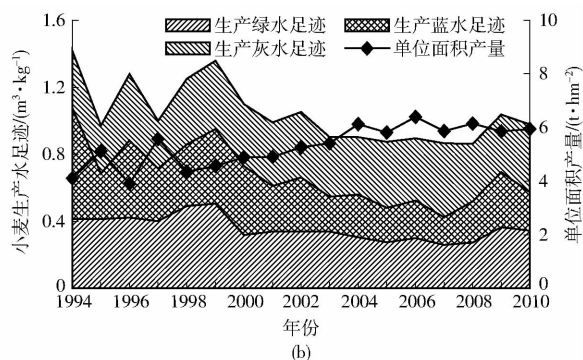


图 1 宝鸡峡灌区 1994—2010 年小麦总水足迹和生产水足迹时程变化

Fig. 1 Temporal variations of total water footprint and production water footprint for wheat in BIA during 1994—2010

灌区单位产量的小麦生产水足迹多年平均值为 1.04 m^3/kg ,最大值为 1.42 m^3/kg (1994 年),最小值为 0.86 m^3/kg (2008 年)。经 Mann-Kendall 检验 1994—2010 年小麦生产水足迹整体呈显著下降趋势 ($P < 0.01$),年均变幅为 -0.02 $\text{m}^3/(\text{kg} \cdot \text{a})$ 。灌区小麦生产绿水和蓝水足迹多年平均值分别为 0.36、0.32 m^3/kg ,下降趋势显著 ($P < 0.01$),年均变幅分别为 -0.011 、 -0.014 $\text{m}^3/(\text{kg} \cdot \text{a})$ 。灰水足迹平均值为 0.37 m^3/kg ,上升不显著,这是由于单产的增加抵消了单位面积灰水消耗量的增加。由图 1b 可见,灌区小麦单位面积产量在 1994—2010 年显著上升 ($P < 0.01$),年均变幅为 135 kg/hm^2 ;在 1994—2004 年间上升明显 ($P < 0.01$),从 2005—2010 年略有波动增产不大, Mann-Kendall 检验无显著趋势。1994—2010 年灌区总种植面积和小麦种植比例都显著减少 ($P < 0.05$),但由于单产的增加,使得整个时段内总产量减少趋势不大,稳定了粮食供给。

2.1.2 小麦生产水足迹空间变化特征

灌区 1994—2010 年小麦生产水足迹、生产绿水足迹、蓝水足迹和灰水足迹的多年平均值空间变化特征如图 2 所示。单位面积小麦生产水足迹从西至

东递增,陈仓、眉县、扶风和杨凌处于低值区 (0.9 ~ 0.96 m^3/kg),武功、兴平和乾县的一部分处于中值区 (0.97 ~ 1.11 m^3/kg),礼泉、咸阳和泾阳处于高值区 (1.12 ~ 1.23 m^3/kg)。生产绿水足迹空间分布趋势和生产水足迹基本一致,只在礼泉和兴平略有不同。生产蓝水足迹自西向东呈带状递增,最高值咸阳可达 0.43 m^3/kg 。生产灰水足迹以兴平为低值区,向东西两侧逐渐递增,最高值 0.40 m^3/kg 也出现在咸阳。灌区生产水足迹的各项指标空间差异性较大,高值区比低值区高 30% 左右,一方面是各地气候因素的空间分布不同,另一方面是产量、灌溉定额和施肥量等受当地习惯影响较大。

利用 Sen 斜率估计灌区 5 个总站 1994—2010 年生产水足迹各指标的年均变幅并进行空间插值得到图 3。除生产灰水足迹外各指标的年均变幅基本呈现自西向东逐渐减小的趋势。生产水足迹年均变幅最大为礼泉的 -0.04 $\text{m}^3/(\text{kg} \cdot \text{a})$,最小为咸阳的 -0.0016 $\text{m}^3/(\text{kg} \cdot \text{a})$,极值比为 25,差异巨大。生产绿水足迹普遍呈下降趋势,年均变幅在 -0.014 ~ -0.007 $\text{m}^3/(\text{kg} \cdot \text{a})$ 之间。生产蓝水足迹总体呈下降趋势,以礼泉降幅最大,咸阳降幅最小,极值比为

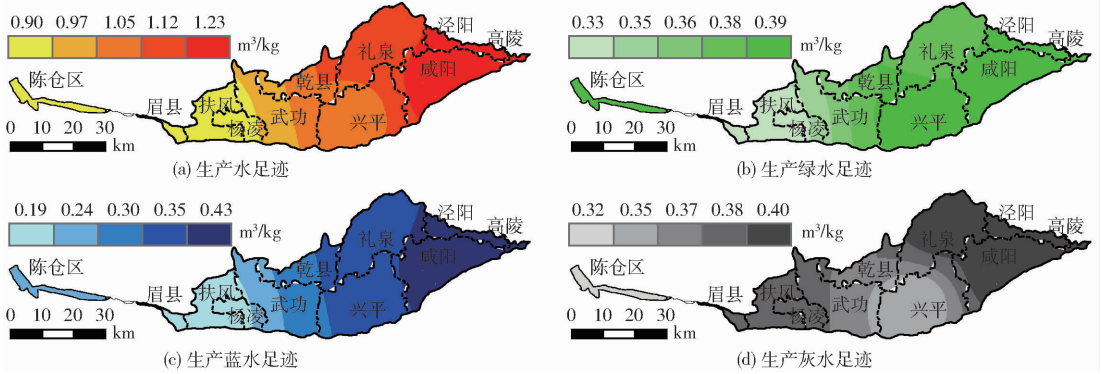


图2 宝鸡峡灌区1994—2010年小麦生产水足迹多年平均值空间变化

Fig. 2 Spatial variations of average of wheat production water footprints in BIA during 1994—2010

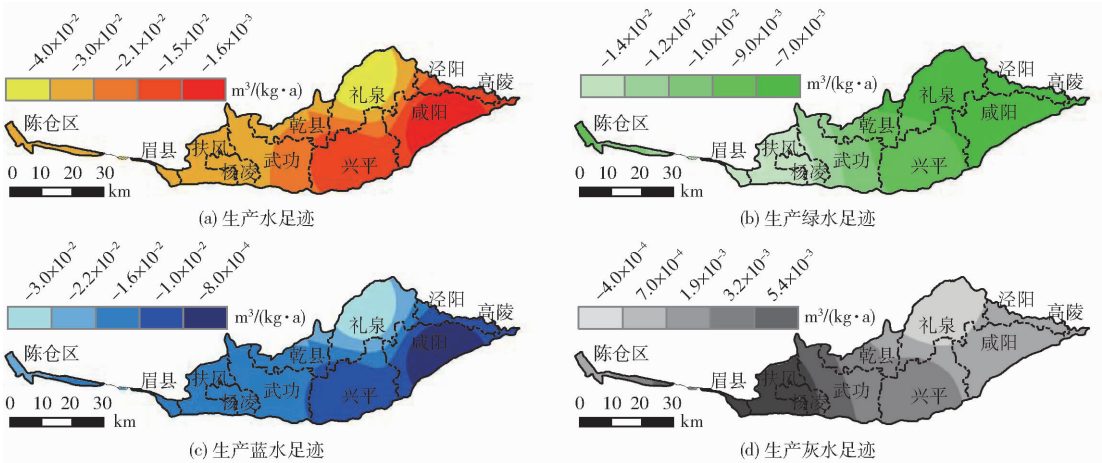


图3 宝鸡峡灌区1994—2010年小麦生产水足迹年均变幅空间分布

Fig. 3 Spatial distributions of annual change of wheat production water footprints in BIA during 1994—2010

37.5。生产灰水足迹除礼泉有小幅下降外,其他地区均有小幅上升,扶风增幅最大,为 $0.0054\text{ m}^3/(\text{kg}\cdot\text{a})$,极值比为13.5。各指标年均变幅的空间分布和多年平均值空间分布相比空间差异性更大,而共同点是总体上自西向东的规律基本一致且极值多出现在咸阳。

2.2 灌区小麦水足迹变化的归因分析

2.2.1 驱动因子归一化序列

为了深入了解驱动因子即气候变化和人类活动的变化,对小麦种植比例和灌溉水有效利用系数以外其他因子进行归一化处理。灌区1994—2010年各驱动因子归一化序列如图4所示,总种植面积归一化序列在1996年到达最高之后显著下降,其他年份均小于基期。小麦种植比例1995年和1997年有2个高峰外,整体平稳下降。灌区为追求更高的经济效益,在种植结构调整中,果树、蔬菜和瓜类比例上升,导致小麦种植比例下降。灌溉定额下降趋势明显且变化波动较大,这和渭河来水量变化、地下水开采以及取水用水政策有密切联系。单位面积施氮量归一化序列持续上升,单位面积绿水消耗趋势不明显。

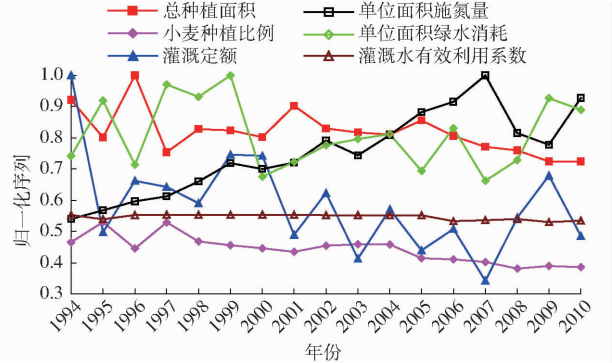


图4 灌区1994—2010年驱动因子归一化序列

Fig. 4 Normalized driving factors in BIA during 1994—2010

2.2.2 驱动因子贡献分析

利用LMDI法取1994年为基期,取 t 为1995—2010年,分解灌区小麦总水足迹变化量如图5所示,各因子对灌区小麦总水足迹变化的贡献量按时间变化呈喇叭口状扩散,表明随着时间变化各因子贡献量逐渐增大,灌区小麦总水足迹受因子的影响也越大。单位面积施氮量和灌溉定额的贡献量较大,一正一负形成两条轮廓线,在2007年最大。对比基期,灌区小麦总水足迹2010年变化量为 -3.00 亿 m^3 ,其中总种植面积引起的贡献为 -1.67 亿 m^3 ,贡献率

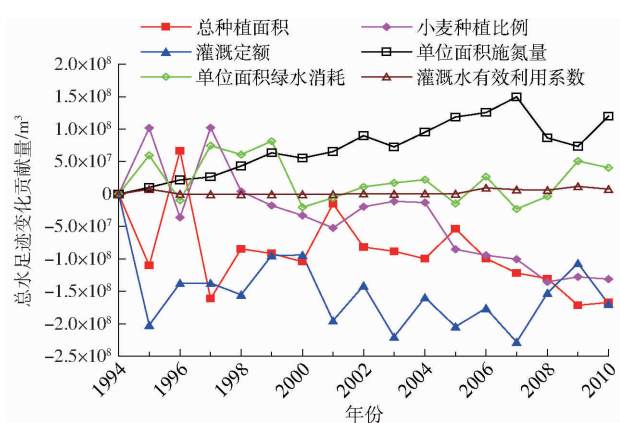


图 5 灌区 1994—2010 年驱动因子对小麦总水足迹变化的贡献量

Fig. 5 Contributions of driving factors to change in WFT for wheat in BIA during 1994—2010

为 -55.78% ; 小麦种植比例贡献为 -1.31 亿 m^3 , 贡献率 -43.76% ; 灌溉定额的贡献为 -1.70 亿 m^3 , 贡献率为 -56.58% ; 灌溉水有效利用系数的贡献为 0.08 亿 m^3 , 贡献率为 2.59% ; 单位面积施氮量的贡献为 1.20 亿 m^3 , 贡献率为 39.96% , 以上人类活动因子的总贡献量为 -3.4 亿 m^3 , 贡献率为 -113.57% 。气候变化即单位面积绿水消耗贡献量为 0.41 亿 m^3 , 贡献率为 13.57% 。

3 讨论

对比其他学者研究结果, 宝鸡峡灌区小麦生产水足迹较低, 如 MEKONNEN 等^[9] 给出黄河流域小麦生产水足迹 1996—2005 年平均值为 $1.54 \text{ m}^3/\text{kg}$, 绿水、蓝水和灰水生产水足迹分别为 0.70 、 0.54 、 $0.31 \text{ m}^3/\text{kg}$ 。不含灰水的相关区域小麦水生产足迹研究有: 刘帝等^[28] 得出 2010 年咸阳市的小麦生产水足迹均值为 $0.83 \text{ m}^3/\text{kg}$, 这与本文咸阳站 $0.93 \text{ m}^3/\text{kg}$ 的结果接近。CAO 等^[29] 给出 2010 年陕西省均值为 $1.13 \text{ m}^3/\text{kg}$, 史利洁等^[30] 得出陕西省均值为 $1.29 \text{ m}^3/\text{kg}$ 。以上研究和本文有一定差异是合理的, 也是由多种原因造成的: 首先宝鸡峡灌区农艺水平较高, 单产明显高于黄河流域、关中地区和陕西省的平均值; 其次水足迹计算选用的公式和条件不同, 本文选用 USDA 月尺度公式和灌区实际灌溉定额计算蓝、绿水足迹, 刘帝等^[28] 选用降水有效利用系数计算绿水, CAO 等^[29] 选用 USDA 旬尺度公式计算绿水, 史利洁等^[30] 按照充分灌溉来计算蓝水, 而在实际农业用水中, 农民更常用非充分灌溉; 再者灌区咸阳站与咸阳市的范围既有重叠区又有很大区别, 本文采用 11 个县(区)的气象资料和灌水资料, 计算结果更符合灌区实际情况。

灌区小麦总水足迹贡献分析表明人类活动的总

贡献远大于气候变化。其中总种植面积和种植比例调整使得灌区粮食作物面积和比例下降, 经济作物的比例上升, 为灌区农民创收提供了良好的条件, 也为削减小麦总水足迹做出了较大贡献, 但考虑到粮食安全是否进一步减少总种植面积和小麦种植比例还值得深入探讨。提高灌溉水有效利用系数可以减少输水损失, 从而减少水资源消耗和降低水足迹。目前灌区灌溉水有效利用系数为 0.55 左右, 虽然高于全国平均水平, 但是多年来由于设施老化还有微小幅度的下降。实验表明适宜的施氮量就可以高产^[23], 过量施肥并不会增产, 反而会对植物根系造成伤害, 不但降低了产量还加剧了渭河的生态环境问题。据调查灌区施肥机械化程度不高^[31], 农民为减少施肥次数单次施肥量偏高, 人工呈片状撒施的肥料与条状的机播麦种不吻合, 造成了肥料浪费。针对各因子贡献率特点, 建议采取减少施肥量, 推广机械施肥, 精确施肥, 增加施肥次数, 修缮老化水利设施, 发展节水灌溉等措施, 来有效降低灌区小麦总水足迹, 减小水资源矛盾和渭河生态环境压力。

4 结论

(1) 1994—2010 年宝鸡峡灌区小麦总水足迹, 绿水、蓝水和灰水足迹呈显著下降趋势, 且水足迹结构发生了明显变化, 由蓝水足迹主导演变为灰水足迹主导; 小麦生产水足迹、生产绿水足迹和蓝水足迹也呈显著下降态势, 而生产灰水足迹无显著变化。在灌区空间尺度上, 小麦生产水足迹、生产绿水足迹和蓝水足迹总体从西向东呈递增趋势, 生产灰水足迹以兴平为中心向两侧递增, 各项指标地理空间差异显著。

(2) 基于水足迹理论和 LMDI 法, 推导了气候变化和人类活动对总水足迹贡献的相关公式, 丰富和完善了水足迹归因分析方法, 为深刻揭示水足迹影响因素提供了有效途径, 可以广泛应用于其他不同区域尺度的水足迹归因分析中。

(3) 归因分析表明, 影响灌区小麦总水足迹变化的主导因子为人类活动因子, 其贡献率为 -113.57% , 而气候变化的贡献率仅为 13.57% ; 人类活动中单位面积施氮量增加和灌溉水有效利用系数降低对总水足迹有正贡献。灌区水足迹各项指标总体优于关中地区和陕西省的平均水平。在种植结构调整中, 随总种植面积和种植比例的减少, 小麦总产量却没显著变化, 主要原因是单产大幅增长, 表明灌区近年来农业生产水平有了明显的提高。根据驱动因子的贡献分析, 提出了针对性建议, 即以减少单位面积施氮量和提高灌溉水有效利用系数, 作为灌区水足迹优化的主要措施。

参 考 文 献

- 1 TURRAL H, BURKE J, FAURÈS J M. Climate change, water and food security. FAO reports 36[R]. Rome: FAO, 2011.
- 2 中华人民共和国水利部. 2015年中国水资源公报[R]. 北京: 中国水利水电出版社, 2016.
- 3 郑捷, 李光永, 韩振中. 中美主要农作物灌溉水分生产率分析[J]. 农业工程学报, 2008, 24(11): 46-50.
ZHENG Jie, LI Guangyong, HAN Zhenzhong. Sino-US irrigation water use efficiencies of main crops[J]. Transactions of the CSAE, 2008, 24(11): 46-50. (in Chinese)
- 4 侯萌瑶, 张丽, 王知文, 等. 中国主要农作物化肥用量估算[J]. 农业资源与环境学报, 2017, 34(4): 360-367.
HOU Mengyao, ZHANG Li, WANG Zhiwen, et al. Estimation of fertilizer usage from main crops in China[J]. Journal of Agricultural Resources and Environment, 2017, 34(4): 360-367. (in Chinese)
- 5 张福锁, 王激清, 张卫峰, 等. 中国主要粮食作物肥料利用率现状与提高途径[J]. 土壤学报, 2008, 45(5): 915-924.
ZHANG Fusuo, WANG Jiqing, ZHANG Weifeng, et al. Nutrient use efficiencies of major cereal crops in China and measures for improvement[J]. Acta Pedologica Sinica, 2008, 45(5): 915-924. (in Chinese)
- 6 操信春, 吴普特, 王玉宝, 等. 水分生产率指标的时空差异及相关关系[J]. 水科学进展, 2014, 25(2): 268-274.
CAO Xinchun, WU Pute, WANG Yubao, et al. Temporal and spatial variation and correlativity of water productivity indexes in irrigated land of China[J]. Advances in Water Science, 2014, 25(2): 268-274. (in Chinese)
- 7 HOEKSTRA A Y, CHAPAGAIN A K, ALDAYA M M, et al. The water footprint assessment manual: setting the global standard [M]. London: Earthscan Press, 2011.
- 8 苏明涛, 张郁, 靳英华. 吉林省主要农作物的生产水足迹研究[J]. 干旱区资源与环境, 2012, 26(7): 26-30.
SU Mingtao, ZHANG Yu, JIN Yinghua. The water footprint of main crops in Jilin Province from a production perspective[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2012, 26(7): 26-30. (in Chinese)
- 9 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 Science, 2010, 14: 1259-1276.
- 10 WANG Y B, WU P T, ENGEL B A, et al. Application of water footprint combined with a unified virtual crop pattern to evaluate crop water productivity in grain production in China[J]. Science of the Total Environment, 2014, 497-498: 1-9.
- 11 付强, 刘焯, 李天霄, 等. 水足迹视角下的黑龙江省粮食生产用水分析[J/OL]. 农业机械学报, 2017, 48(6): 184-192.
http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20170624&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2017.06.024.
FU Qiang, LIU Ye, LI Tianxiao, et al. Analysis of water utilization in grain production from water footprint perspective in Heilongjiang Province[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(6): 184-192. (in Chinese)
- 12 CAO Xinchun, WU Pute, WANG Yubao, et al. Water footprint of grain product in irrigated farmland of China[J]. Water Resources Management, 2014, 28: 2213-2227.
- 13 刘静, 吴普特, 王玉宝, 等. 河套灌区粮食水足迹与虚拟水净输出时空演变[J]. 排灌机械工程学报, 2014, 32(5): 435-440.
LIU Jing, WU Pute, WANG Yubao, et al. Temporal and spatial variation of grain production water footprint and net virtual water export in Hetao Irrigation District[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2014, 32(5): 435-440. (in Chinese)
- 14 SUN Shikun, WU Pute, WANG Yubao. The impacts of interannual climate variability and agricultural inputs on water footprint of crop production in an irrigation district of China[J]. Science of the Total Environment, 2013, 444: 498-507.
- 15 张宇, 李云开, 欧阳志云, 等. 华北平原冬小麦—夏玉米生产灰水足迹及其县域尺度变化特征[J]. 生态学报, 2015, 35(20): 6647-6654.
ZHANG Yu, LI Yunkai, OUYANG Zhiyun, et al. The grey water footprint of the winter wheat—summer maize crop rotation system of the North China Plain[J]. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(20): 6647-6654. (in Chinese)
- 16 孙世坤, 王玉宝, 吴普特, 等. 小麦生产水足迹区域差异及归因分析[J]. 农业工程学报, 2015, 31(13): 142-148.
SUN Shikun, WANG Yubao, WU Pute, et al. Spatial variability and attribution analysis of water footprint of wheat in China[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(13): 142-148. (in Chinese)
- 17 ANG B W, LIU F L. A new energy decomposition method: perfect in decomposition and consistent in aggregation[J]. Energy, 2001, 26: 537-548.
- 18 XU Yanjie, HUANG Kai, YU Yajuan, et al. Changes in water footprint of crop production in Beijing from 1978 to 2012: a logarithmic mean Divisia index decomposition analysis[J]. Journal of Cleaner Production, 2015, 87: 180-187.
- 19 ZHAO X, TILLOTSON M R, LIU Y W, et al. Index decomposition analysis of urban crop water footprint[J]. Ecological Modeling, 2017, 348: 25-32.
- 20 陕西省统计局, 国家调查局陕西调查总队. 陕西省统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 1995—2011.
- 21 陕西省水利水土保持厅, 西北农业大学. 陕西省作物需水量及分区灌溉模式[M]. 北京: 水利电力出版社, 1992.
- 22 ALLEN R G, PEREIRA L S, RAES D, et al. Crop evapotranspiration-guidelines for computing crop water requirements[M].

Rome: FAO Irrigation and Drainage Paper, 1998.

- 23 张明. 陕西关中冬小麦/夏玉米轮作体系下合理施肥技术研究[D]. 杨凌:西北农林科技大学, 2011.
ZHANG Ming. Research of reasonable fertilizer application technology of winter wheat/summer maize rotation system in Guanzhong area of Shaanxi[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2011. (in Chinese)
- 24 EPA. List of drinking water contaminants; ground water and drinking water [S/OL]. Washington, DC: US Environmental Protection Agency, 2005. <https://www.epa.gov/ground-water-and-drinking-water/national-primary-drinking-water-regulations>.
- 25 SEN P K. Estimates of the regression coefficient based on Kendall's tau[J]. Journal of the American Statistical Association, 1968, 63(324): 1379 - 1389.
- 26 MANN H B. Nonparametric tests against trend[J]. Econometrica, 1945, 13(3): 245 - 259.
- 27 KENDALL M G. Rank correlation methods[M]. London: Charles Griffin, 1975.
- 28 刘帝, 操信春, 王玉宝. 基于田间实际耗水的作物生产水足迹[J]. 排灌机械工程学报, 2014, 32(8): 719 - 724.
LIU Di, CAO Xinchun, WANG Yubao. Water footprint of grain production based on crop water consumption[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2014, 32(8): 719 - 724. (in Chinese)
- 29 CAO Xinchun, WU Pute, WANG Yubao, et al. Assessing blue-green water utilization in wheat production of China from the perspectives of water footprint and total water use[J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2014, 18(8): 3165 - 3178.
- 30 史利洁, 吴普特, 王玉宝, 等. 基于作物生产水足迹的陕西省水资源压力评价[J]. 中国生态农业学报, 2015, 23(5): 650 - 658.
SHI Lijie, WU Pute, WANG Yubao, et al. Assessment of water stress in Shaanxi Province based on crop water footprint [J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2015, 23(5): 650 - 658. (in Chinese)
- 31 雷锦飞, 刘斌侠, 付存仓, 等. 岐山县粮食作物施肥现状及存在问题[J]. 陕西农业科学, 2014, 60(3): 84 - 86.

(上接第 220 页)

- 22 李文凤, 张晓平, 梁爱珍, 等. 不同耕作方式下黑土的渗透特性和优先流特征[J]. 应用生态学报, 2008, 19(7): 1506 - 1510.
LI Wenfeng, ZHANG Xiaoping, LIANG Aizhen, et al. Characters of infiltration and preferential flow of black soil in Northeast China under different tillage patterns[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2008, 19(7): 1506 - 1510. (in Chinese)
- 23 魏虎伟, 程金花, 张洪江, 等. 四面山 2 种林地大孔隙特征与优先流关系研究[J]. 水土保持学报, 2012, 26(4): 263 - 268.
WEI Huwei, CHENG Jinhua, ZHANG Hongjiang, et al. Relationships between soil macropores properties and preferential flow about two kind of woodlands in simian mountains[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2012, 26(4): 263 - 268. (in Chinese)
- 24 张欣, 张洪江, 张福明, 等. 西南山区农地土壤前期含水量对优先流的影响[J]. 水土保持学报, 2014, 28(2): 1 - 7.
ZHANG Xin, ZHANG Hongjiang, ZHANG Fuming, et al. Effect of antecedent soil moisture on preferential flow in agricultural land of southwest mountains[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2014, 28(2): 1 - 7. (in Chinese)
- 25 FLURY M, FLUHLERH, JURYW A, et al. Susceptibility of soils to preferential flow of water—a field study [J]. Water Resources Research, 1994, 30(7): 1945 - 1954.
- 26 梁建宏, 吴艳宏, 周俊, 等. 土壤类型对优先流路径和磷形态影响的定量评价 [J/OL]. 农业机械学报, 2017, 48(1): 220 - 227. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20170129&flag=1&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2017.01.029.
LIANG Jianhong, WU Yanhong, ZHOU Jun, et al. Quantitative evaluation of effect of soil types on preferential flow pathways and soil phosphorus forms [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(1): 220 - 227. (in Chinese)
- 27 CYMBERKNOP L J, LEGNANI W, BARRA J G, et al. Fractal dimension as an index of left ventricular ischaemia: a pilot study [J]. Physiological Measurement, 2013, 34(1): 83 - 97.
- 28 刘继龙, 周延, 付强, 等. 黑土区玉米地作物信息多重分形与多尺度相关特征研究 [J/OL]. 农业机械学报, 2016, 47(6): 163 - 170, 162. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20160621&flag=1&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2016.06.021.
LIU Jilong, ZHOU Yan, FU Qiang, et al. Multifractal and multi-scale correlation characteristics of crop information of corn field in black soil region [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(6): 163 - 170, 162. (in Chinese)
- 29 王金满, 张萌, 白中科, 等. 黄土区露天煤矿排土场重构土壤颗粒组成的多重分形特征 [J]. 农业工程学报, 2014, 30(4): 230 - 238.
WANG Jinman, ZHANG Meng, BAI Zhongke, et al. Multi-fractal characteristics of reconstructed soil particle in opencast coal mine dump in loess area [J]. Transactions of the CSAE, 2014, 30(4): 230 - 238. (in Chinese)