

基于 VTCI 空间尺度上推方法的干旱影响评估

白雪娇¹ 王鹏新¹ 张树誉² 李俐¹ 王蕾¹ 解毅¹

(1. 中国农业大学信息与电气工程学院, 北京 100083; 2. 陕西省气象局, 西安 710014)

摘要: 基于关中平原 Aqua MODIS 条件植被温度指数 (VTCI) 的干旱监测结果, 分别采用分布式和聚合式的主导类变异权重法 (DCVW)、算术平均值变异权重法 (AAVW) 和中值变异权重法 (MPVW) 对市域单元内 VTCI 进行空间尺度上推, 以获取冬小麦主要生育期聚合后的加权 VTCI; 以加权 VTCI 与冬小麦产量间的回归分析精度为参考, 选择最为合适的空间尺度上推方法。结果表明: 采用分布式获得的加权 VTCI 与冬小麦产量的回归分析结果整体优于聚合式获得的结果。在分布式的上推过程中, MPVW 获得的加权 VTCI 与冬小麦产量间的回归分析精度较低, DCVW 和 AAVW 的精度均较高, 其中 DCVW 获得的加权 VTCI 与冬小麦产量间回归分析的决定系数 R^2 达 0.64, 精度最高, 说明采用分布式 DCVW 对市域单元内 VTCI 进行空间尺度上推得到的加权 VTCI 最为合理。

关键词: 条件植被温度指数; 空间尺度上推; 干旱影响评估; 精度评价

中图分类号: S127 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2017)02-0172-07

Drought Impact Assessment Based on Spatial Up-scaling Methods of Vegetation Temperature Condition Index

BAI Xuejiao¹ WANG Pengxin¹ ZHANG Shuyu² LI Li¹ WANG Lei¹ XIE Yi¹

(1. College of Information and Electrical Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China

2. Shaanxi Provincial Meteorological Bureau, Xi'an 710014, China)

Abstract: Up-scaling method for inferring spatial information from a pixel scale to a basic unit scale has significant effects on aggregating results and decision-making. Therefore, developing appropriate methods to accurately up-scale spatial data is the key to infer useful drought information. The time series of vegetation temperature condition index (VTCI) drought monitoring results in Guanzhong Plain from early March to late May in the years from 2008 to 2013 were spatially transformed from a pixel scale to a basic unit scale by using the dominant class variability-weighted method (DCVW), arithmetic average variability-weighted method (AAVW) and median pixel variability-weighted method (MPVW) in the distributed mode and aggregated mode to obtain the aggregated VTCIs. The weighted VTCIs of winter wheat in main growth period were calculated, and the regression analysis between the weighted VTCIs and winter wheat yields was applied as references to evaluate up-scaling methods. The results showed that the regression analysis results of the three methods in the distributed up-scaling mode were generally better than those in the aggregated up-scaling mode. The regression analysis results in the distributed up-scaling mode also indicated that the computing accuracy was high by DCVW and AAVW and was low by MPVW. DCVW in the distributed up-scaling mode was the most accurate method with the highest determination coefficient and the lowest estimated standard error, which were 0.64 and 289.97 kg/hm², respectively. The estimation yields of winter wheat which obtained by DCVW were very close to the levels of statistics yearbook of Shaanxi Province, indicating that the estimation precision of DCVW method was high, and the method was robust. Overall, the method of DCVW in distributed up-scaling mode was the most reasonable approach to up-scale VTCIs in Guanzhong Plain from a pixel scale to a basic unit scale.

Key words: vegetation temperature condition index; spatial up-scaling; drought impact assessment; precision evaluation

收稿日期: 2016-06-16 修回日期: 2016-07-28

基金项目: 国家自然科学基金项目(41371390)

作者简介: 白雪娇(1988—), 女, 博士生, 主要从事定量遥感及其在农业中的应用研究, E-mail: baixuejiaoz@126.com

通信作者: 王鹏新(1965—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事定量遥感及其在农业中的应用研究, E-mail: wangpx@cau.edu.cn

引言

近年来,中纬度地区气候暖干化使得全球范围内的干旱问题日趋严重,对农业生产造成严重影响^[1]。关中平原地处内陆中纬度地带和季风边缘气候敏感区,远离水汽源地,对气候变化敏感,旱灾频发,且具有持续时间长、强度大、空间差异明显等特点;干旱程度由西南向东北逐渐加剧,东北部和中北部地区干旱最为严重^[2-6],对关中平原的农业生产和人民生活产生了影响,因此监测干旱对作物生长及产量的影响以有效应对干旱对区域农业的影响具有重要的意义。

遥感技术的发展为实时、精确和大范围反演地面信息提供了技术手段,在旱情监测、旱情影响评估和农作物估产等方面已得到广泛的应用。国内外研究者通过能够反映作物生长发育或与其密切相关的各种指数与产量的相关性关系研究,建立经验模型,进行了较多农作物产量的估算、预报和干旱影响评估、预警研究^[7-12]。在利用遥感数据建立优化模型时,某一尺度的指数(变量)需准确映射遥感数据的空间信息,显然像素尺度不是最佳的选择,需将遥感数据的空间信息从像素尺度转换为研究所需的基本地域单元的尺度。聚合方法会显著影响聚合结果,进而影响基于结果的决策^[13-15],因此准确聚合空间数据的方法是推导和获取有用空间信息的关键。马玉平等^[16]采用区域气候模式输出的逐日平均温度、降水和总辐射与模拟气象产量建立积分回归模型,探讨了未来40年气候变化对我国玉米产量的可能影响。杜灵通等^[17]使用山东省15个地级市综合干旱指数各像元的平均值与气象站点获得的标准化降水指数做相关分析验证了综合干旱指数监测气象干旱的能力。赵捷等^[18]对黑河中上游流域各土地覆被类型所有栅格的LAI(叶面积指数)和累计相对湿度指数求平均值,对其进行皮尔逊回归分析以定量评价不同土地覆被类型LAI对气象干旱的响应。李艳等^[19]取关中平原各市内所包含像素VTCI(条件植被温度指数)的平均值计算冬小麦生育期的加权VTCI,与冬小麦产量建立回归模型,评估了干旱对冬小麦产量的影响。

学者们采用窗口均值法(Window averaging, WA)求取某些表征干旱指标的区域平均值进行干旱影响评估或估产研究,获得了一些有价值的结论。但基于区域内某指数的平均值弱化了其他覆盖类型的信息及其与主导地位覆盖信息的相互影响,缺乏宏观性、综合性的空间分析。且仅当研究区域内所有像素值呈正态分布和转换前后分辨率为线性关系

时,WA能够简单、准确的逼近其空间信息的综合特征^[20],而区域内旱情信息时空变异较大,采用WA将会获得有偏估计值。同时,遥感影像相邻像素的旱情信息表现出强烈的空间自相关性^[21]。地表异质性、地形地貌差异和人为因素等也会造成旱情空间变异性^[22],因此,对基本地域单元内旱情信息进行聚合时需综合考虑其空间变异性 and 空间异质性特征,有效地检测地表空间格局、过程的相互作用并准确映射,将表征区域内旱情信息的数据集聚合为一个综合了基本地域单元内旱情信息的综合指数值。此外,统计产量为区域统计水平的产量,受区域内各种因素的影响。基本地域单元的聚合指数需为区域内各种因素影响下具有统计特征的指数,能够反映基本地域单元内综合地物信息特征及其相互影响。WA可被认为是窗口内每个像素具有同样权重的滤波窗的特例^[20],而在实际应用中,基本地域单元内各像素应分配不同的权重值,再乘以其对应的VTCI并加和得到基本地域单元的综合VTCI,即空间变异权重法(spatial variability-weighted methods)。空间变异权重法考虑了空间自相关性和变异性,改善了基本地域单元的上推结果。目前利用空间变异权重方法获取区域的聚合加权指数的研究还鲜见报道。

条件植被温度指数(VTCI)综合了反射和辐射信息,已证明可用于监测旱情状况和作物估产^[23-24]。本文在前人研究及课题组前期所做冬小麦干旱影响评估的基础上^[19,25],以关中平原的市为基本地域单元,采用空间变异权重法对关中平原各市2008—2013年冬小麦返青后的主要生育期旬尺度的Aqua MODIS VTCI时间序列数据进行空间尺度上推获取聚合VTCI,计算冬小麦主要生育期加权VTCI后与冬小麦产量进行回归分析,以回归分析精度为参考,并与WA对比分析,选择适合于关中平原的VTCI尺度上推方法,为应用于干旱影响评估的区域指数空间尺度聚合提供思路和方法。

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

关中平原又称渭河平原,位于陕西省中部,西起宝鸡、东至潼关,南接秦岭、北至北山,总面积约 $5.55 \times 10^6 \text{ hm}^2$ 。地处渭河谷地,土地肥沃,有泾、渭等河流提供水源,十分适宜耕作,是陕西省主要粮食产区 and 我国重要的粮食产区。年平均温度 $6 \sim 13 \text{ }^\circ\text{C}$,年均降水量 $500 \sim 600 \text{ mm}$,处于暖温带半湿润与半干旱的过渡地带,为典型的大陆性季风气候区,雨热同期,降水主要集中在7—9月份,冬季、春季降水量较少,冬旱、春旱严重,造成粮食减产。将研究

区域的行政边界矢量图叠加到 VTCI 遥感影像上, 对其按照各市的行政边界进行市属的划分, 获得关中平原分市概况图(图 1)。由于杨凌示范区面积较小, 故将其划分到咸阳市境内。

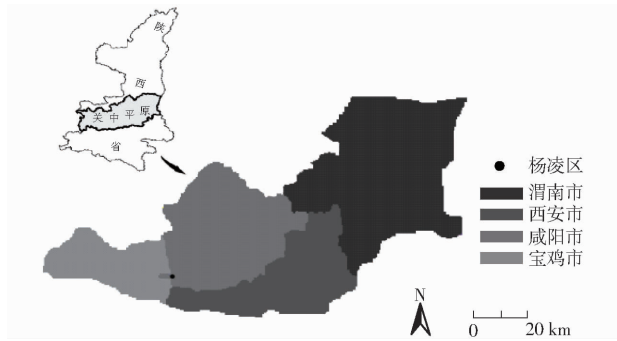


图 1 研究区概况图

Fig. 1 Map of study area

1.2 数据来源及预处理

1.2.1 数据来源

数据源主要是 2008—2013 年 Aqua MODIS 数据产品, 包括日反射率产品 (MYD09GA) 和日 LST 产品 (MYD11A1)。冬小麦产量数据来源于历年的《陕西省统计年鉴》。本文还采用陕西省行政区划图、DEM 数据以及 TM 数据辅助确定研究区的范围。

1.2.2 条件植被温度指数生成

基于日 NDVI (归一化差分植被指数) 和 LST (地表温度), 应用最大值合成技术分别生成旬 NDVI 和 LST 最大值合成产品, 并以此计算条件植被温度指数 (VTCI)^[26-27]

$$V = \frac{L_{\max}(N_i) - L(N_i)}{L_{\max}(N_i) - L_{\min}(N_i)} \quad (1)$$

$$\text{其中 } L_{\max}(N_i) = a + bN_i \quad (2)$$

$$L_{\min}(N_i) = a' + b'N_i \quad (3)$$

式中 N_i ——第 i 个时期 (旬) 某一像素的 NDVI

$L(N_i)$ ——某一像素的 NDVI 为 N_i 时的 LST

$L_{\max}(N_i)$ ——当 N_i 值等于某一特定值时所有像素 LST 的最大值

$L_{\min}(N_i)$ ——当 N_i 值等于某一特定值时所有像素 LST 的最小值

a, b, a', b' ——待定系数, 由研究区域内 NDVI 和 LST 散点图近似获得

VTCI 取值范围为 0~1, 值越小, 旱情越严重。计算关中平原 2008—2013 年每年 3 月上旬—5 月下旬共 54 旬的 VTCI 数据。

1.3 空间尺度上推方法

1.3.1 空间变异权重法

基本地域单元内的局部空间自相关性可通过像素值和主导空间特征值的方差加以衡量, 某像素值

距主导空间特征像素值越远, 方差越大, 上推时给予其权重越小。通常将方差的倒数作为权重^[20]。衡量主导空间特征像素值的方式不同产生不同的空间尺度上推方法。

本研究采用 3 种不同方法获取基本地域单元内的主导空间特征 VTCI 对基本地域单元内 VTCI 进行空间尺度上推。第 1 种方法是主导类变异权重法 (Dominant class variability-weighted method, DCVW), 首先根据确定的基本地域单元内 VTCI 的频率分布确定主导类像素值, 取频率最大的 VTCI 作为主导空间特征 VTCI, 计算每个像素 VTCI 与主导空间特征 VTCI 的方差的倒数再除以 VTCI 的加和值即为此像素的权重。这种方法可以灵活运用于不同分布状态数据的空间尺度上推研究。其计算式为

$$V_U = \sum_{i=1}^m W_i V_i \quad (4)$$

$$\text{其中 } W_i = \frac{1}{(V_i - V_d)^2 \sum_{i=1}^m (V_i - V_d)^2} \quad (5)$$

式中 V_U ——基本地域单元内尺度上推后的 VTCI

V_i ——基本地域单元内某一像素的 VTCI

W_i ——权重

V_d ——主导空间特征像素 VTCI

m ——基本地域单元内总像素数

第 2 种方法是中值变异权重法 (Median pixel variability-weighted method, MPVW), 假设基本地域单元内中间像素 VTCI 具备主导空间特征的机率最高, 可通过中间像素 VTCI 和每个像素 VTCI 的方差量化空间变异, 即将基本地域单元内所有像素的 VTCI 进行排序 (若灰度相等则只取其一参与排序), 若参与排序的像素个数为奇数, 取其中值作为主导空间特征像素 VTCI; 若为偶数, 则取中间 2 个值的均值作为主导空间特征像素 VTCI。计算式为

$$V_d = \begin{cases} V_m & (m \text{ 为奇数}) \\ \frac{1}{2}(V_{m_1} + V_{m_2}) & (m \text{ 为偶数}) \end{cases} \quad (6)$$

式中 V_m ——基本地域单元内所有参与排序像素的 VTCI 中间值

V_{m_1}, V_{m_2} ——基本地域单元内所有参与排序像素 VTCI 的 2 个中间值

第 3 种方法是算术平均值变异权重法 (Arithmetic average variability-weighted method, AAVW), 以基本地域单元内所有像素的 VTCI 算术平均值和每个像素 VTCI 方差的倒数来衡量基本地

域单元内像素 VTCI 的空间变异性和相关性,即将基本地域单元内所有像素 VTCI 的算术平均值作为主导类空间特征像素 VTCI,计算式为

$$V_d = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m V_i \quad (7)$$

3 种方法除基本地域单元内主导空间特征像素 VTCI 的确定方法不同外,其计算方程和过程是一致的,在实际计算过程中仅将第 1 种方法中的像素主导类 VTCI 分别替换为中值和算术平均值即可。

1.3.2 不同生育期聚合式和分布式尺度上推

结合冬小麦越冬后生长发育情况,将其越冬后主要生育期划分为返青期(3 月上旬—3 月中旬)、拔节期(3 月下旬—4 月中旬)、抽穗—灌浆期(4 月下旬—5 月上旬)和乳熟期(5 月中旬—5 月下旬)。运用聚合式(Aggregated)和分布式(Distributed)2 种方式进行空间尺度上推:①先依据主要生育期的划分,取生育期内所包含各旬 VTCI 的平均值作为该生育期的 VTCI,再对研究区域内所有像素冬小麦各生育期的 VTCI 数据进行空间尺度上推,为聚合式。②先对研究区域内所有像素冬小麦各旬 VTCI 数据进行空间尺度上推,再计算生育期内各旬 VTCI 的平均值作为该生育期的 VTCI,为分布式。以返青期为例,聚合式和分布式过程如图 2 所示。

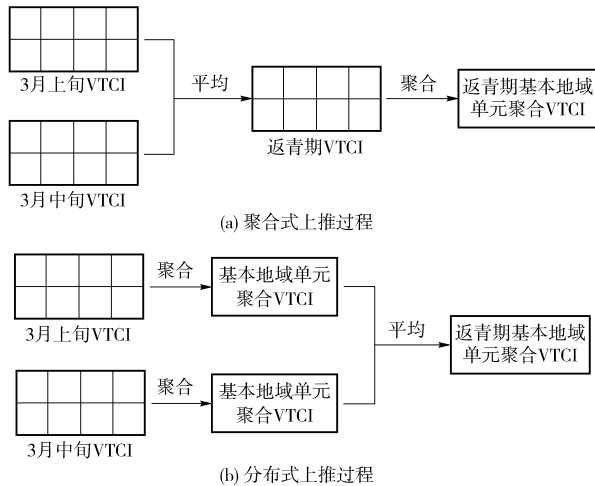


图 2 聚合式与分布式尺度上推过程示意图

Fig. 2 Up-scaling process schematics of aggregated and distributed modes

1.4 精度评价方法

采用决定系数 R^2 、估计值标准误差和 F 检验比较分析 VTCI 上推结果的精度,并应用相对误差(RE)与均方根误差(RMSE)比较冬小麦产量估计结果与年鉴统计结果之间的差异,以评价尺度上推方法的效果与精度。

基于关中平原 2008—2013 年每年 3—5 月份共 54 旬 Aqua MODIS VTCI 时间序列数据,采用聚合式

和分布式 DCVW、MPVW、AAVW 3 种空间尺度上推方法,获取渭南市、咸阳市、西安市和宝鸡市的聚合 VTCI。根据前期研究成果确定的冬小麦不同生育时期干旱对产量影响的权重系数(返青期 0.03、拔节期 0.50、抽穗—灌浆期 0.30、乳熟期 0.17)^[25],计算冬小麦主要生育期的加权 VTCI。参照陕西省统计年鉴的各市冬小麦产量数据,对 3 种空间尺度上推方法所得加权 VTCI 与冬小麦产量作回归分析和精度评价,以目前广泛应用的窗口均值法(WA)为参考,确定适用于关中平原干旱影响评估的区域 VTCI 空间尺度上推方法。

2 结果与分析

2.1 不同上推方法获得的基本地域单元 VTCI 与冬小麦产量回归分析

采用 3 种空间尺度上推方法获取关中平原基本地域单元的聚合 VTCI,分别计算冬小麦主要生育期的加权 VTCI 并与冬小麦产量进行回归分析,结果如表 1 所示。结果表明,聚合式上推方式获得的基本地域单元的聚合 VTCI 与冬小麦产量的回归模型均通过 F 检验,其中 MPVW 的显著性检验 P 为 0.005,其他上推方法的 P 均小于 0.000 1,均达到极显著水平,说明 3 种空间尺度上推方法获得的基本地域单元聚合 VTCI 与冬小麦产量的关系紧密。MPVW 的决定系数为 0.30,估计值标准误差为 403.94 kg/hm²,精度差于 WA;DCVW 和 AAVW 的决定系数均较大且大于 WA,估计值标准误差均较小且小于 WA,说明与 WA 相比,采用 DCVW 和 AAVW 获得的估计值与真实值的近似误差较小。其中 DCVW 的决定系数达到 0.62,估计值标准误差为 298.83 kg/hm²,精度高于 WA、MPVW 和 AAVW,表明 DCVW 回归方程的代表性大于 WA、MPVW 和

表 1 基于 WA、DCVW、MPVW 和 AAVW 空间尺度上推获得的聚合 VTCI 与冬小麦产量的线性回归分析

Tab. 1 Linear regression analysis of winter wheat yields and aggregated VTCIs up-scaled by WA, DCVW, MPVW and AAVW

上推方式	上推方法	决定系数 R^2	估计值标准误差 / (kg·hm ⁻²)	P	F
聚合式	WA	0.55	323.65	<0.000 1	27.18
	DCVW	0.62	298.83	<0.000 1	35.69
	MPVW	0.30	403.94	0.005	9.57
	AAVW	0.56	323.24	<0.000 1	27.31
分布式	WA	0.56	321.93	<0.000 1	27.71
	DCVW	0.64	289.97	<0.000 1	39.27
	MPVW	0.30	403.47	0.005	9.64
	AAVW	0.59	307.02	<0.000 1	32.65

AAVW,即聚合式 DCVW 优于聚合式 WA、MPVW 和 AAVW,聚合式 DCVW 能更好地映射基本地域单元的聚合 VTCI 与冬小麦产量的相关性。

分布式上推方法获得的基本地域单元聚合 VTCI 与冬小麦产量回归模型均通过 F 检验,其显著性检验 P 除 MPVW 为 0.005 外均小于 0.000 1,均达到极显著水平,表明尺度上推后的 VTCI 与关中平原冬小麦产量极显著相关。MPVW 的决定系数为 0.30,估计值标准误差为 403.47 kg/hm²,精度低于 WA;DCVW 和 AAVW 的决定系数分别达到了 0.64 和 0.59,估计值标准误差分别为 289.97 kg/hm² 和 307.02 kg/hm²,精度较高且高于 WA。其中 DCVW 获得的决定系数最大,估计值的标准误差最小,其回归模型拟合优度较好,回归方程的可靠性和实用价值较其他方法大,说明 DCVW 对基本地域单元 VTCI 的空间尺度上推较为合理和准确。

由分析结果可知,由于分布式尺度上推过程充分考虑了冬小麦某一生育期每旬 VTCI 各像素间的变异性 and 相关性,分布式上推方法的结果整体略优于聚合式结果。MPVW 的回归分析精度明显差于 WA、DCVW 和 AAVW。这是由于 MPVW 取基本地域单元内所有 VTCI 的中间值作为主导空间特征像素值,而基本地域单元内地表旱情变异较大,其 VTCI 分布可能为偏态分布,尺度上推的过程是基本地域单元内所有像素值向某一值聚集的过程,当基本地域单元内的像素值分布为偏态分布时即较早或较不早时,利用 MPVW 进行尺度上推易弱化偏早或较不早的信息,造成尺度上推结果偏离。而 DCVW 则考虑了不同程度旱情的分布,以基本地域单元内频率最大的 VTCI 作为主导空间特征 VTCI,确定的聚合 VTCI 具有代表性且较为准确,因此,分布式 DCVW 更适用于开展基于干旱影响评估的关中平原 VTCI 空间尺度上推研究。

2.2 基于分布式 DCVW 获得的冬小麦估计产量及其精度评价

采用分布式 DCVW 空间尺度上推方法获得的聚合 VTCI 估算关中平原各市 2008—2013 年的冬小麦产量,结合各市的历年产量统计数据对估产结果的精度进行评价(表 2)。结果表明,关中平原各市的产量估计结果与年鉴统计的产量较为接近, RMSE 和 RE 均较小,说明分布式 DCVW 空间尺度上推方法确定的聚合 VTCI 均较为合理。统计冬小麦产量估计结果相对误差的区间分布,分布式 DCVW 获得的结果中相对误差小于 5.0% 的达到了 66.67%,进一步说明采用分布式 DCVW 空间尺度上推方法获取的聚合 VTCI 的估计产量精度较高。

表 2 基于分布式 DCVW 尺度上推方法冬小麦估计产量与统计产量对比分析

Tab. 2 Comparison of winter wheat estimated yields with statistic data based on DCVW

地区	RMSE/(kg·hm ⁻²)	RE/%
渭南市	374.03	8.20
咸阳市	258.36	5.48
宝鸡市	241.91	3.82
西安市	204.13	4.25

关中平原是春旱的高发地。据气象部门报道,2013 年陕西省遭遇了自 1961 年以来最严重的一次气候干旱。关中平原降水稀少,与历年同期相比偏少 50%~90%。以采用分布式 DCVW 获得的聚合 VTCI 估算的关中平原各市 2013 年冬小麦产量为例,与年鉴统计的产量进行对比分析,结果显示,各市的产量估计结果与年鉴统计产量较为接近,估计产量精度较高。渭南市的实际产量为 3 307 kg/hm²,估计产量为 3 394.67 kg/hm²,绝对误差为 87.67 kg/hm²,相对误差为 2.65%;咸阳市实际产量为 3 966 kg/hm²,估计产量为 3 636.95 kg/hm²,绝对误差为 -329.04 kg/hm²,相对误差为 8.29%;宝鸡市实际产量为 3 879 kg/hm²,估计产量为 4 130.23 kg/hm²,绝对误差为 251.23 kg/hm²,相对误差为 6.47%;西安市实际产量为 4 153 kg/hm²,估计产量为 3 931.58 kg/hm²,绝对误差为 -221.41 kg/hm²,相对误差为 5.33%。结果进一步表明采用分布式 DCVW 空间尺度上推得到的基本地域单元的聚合 VTCI 应用于干旱影响评估精度较高,可用于关中平原冬小麦的干旱影响评估。

3 讨论

将旱情的空间信息从像素尺度转换为研究所需的基本地域单元尺度所采用的方法会显著影响聚合结果,进而影响基于聚合结果的干旱影响评估精度,因此准确聚合有用空间旱情信息的方法是干旱影响评估的关键。关中平原地处季风边缘气候敏感区,对气候变化敏感,旱灾频发,旱情空间分布不均且强度差异较大,准确评估干旱影响具有重要意义。准确推断旱情空间信息的关键在于抓住旱情信息的主导空间特征、格局和过程^[21]。基本地域单元内像素的 VTCI 具有空间自相关性且空间变异性较大。采用 WA 获取区域聚合 VTCI 以衡量干旱对冬小麦产量影响的传统计算方法仅是将研究区域内像元信息平均化,忽视和弱化了旱情信息的自相关性和变异性,不能够准确反映研究区域覆盖范围内干旱综合信息特征。本文采用空间变异权重法中的 DCVW、

MPVW 和 AAVW 空间尺度上推方法获取冬小麦各生育期基本地域单元的聚合 VTCI。其中 DCVW 的精度远高于 WA。这是由于基本地域单元内旱情的时空变异性较大,DCVW 在数据处理过程中首先考虑旱情信息空间分布的主导特征,选择基本地域单元内 VTCI 频率分布最大的 VTCI 作为主导空间特征 VTCI,通过计算基本地域单元内每个像素 VTCI 与主导空间特征 VTCI 的方差来衡量局部空间自相关。在对基本地域单元内所有像素 VTCI 进行聚合时,DCVW 通过对每个像素赋予不同的权重,可灵活、准确估算 VTCI 表征的旱情空间信息空间自相关性和变异性,能够有效地检测地表空间格局的相互作用,减少旱情信息损失,其获得的聚合 VTCI 有效、准确地反映了基本地域单元区域覆盖范围内综合旱情信息特征。相对于前人及课题组前期采用 WA 所做的干旱影响评估研究^[19],采用 DCVW 对基本地域单元内旱情信息聚合上推获得的结果精度和鲁棒性都得到显著改善和提高。

本文中 DCVW 的空间尺度上推效果最好,而 MPVW 的效果最差,这是由于干旱的形成是一种复杂的过程,关中平原 VTCI 随结构性因素变化,表现出地域差异性。DCVW 是将能够代表主导类像素的值作为主导空间特征像素值进行上推,而 MPVW 则是仅考虑了中间 1 个或 2 个像素作为主导空间特征像素值,容易造成主导空间特征像素值错估,同时,当基本地域单元内的像素值分布为偏态分布时,容易弱化引起偏度分布的旱情信息,利用 MPVW 容易出现尺度上推结果偏离的现象。

分布式结果整体优于聚合式结果,这主要是由于分布式尺度上推过程充分考虑了冬小麦某一生育期各旬 VTCI 像素间的变异性和相关性,而聚合式上推过程仅针对冬小麦某一生育期各旬平均 VTCI 进行估算,忽视和弱化了各旬 VTCI 的特征和变异。

4 结论

(1) 通过分析分布式和聚合式 DCVW、MPVW 和 AAVW 空间尺度上推方法得到的聚合 VTCI 与冬小麦产量的回归分析结果,结果表明 MPVW 差于 WA,而 DCVW 和 AAVW 均优于 WA。尤其是分布式 DCVW,其回归模型精度最高,拟合优度最好,分布式 DCVW 对关中平原冬小麦不同生育时期基本地域单元聚合 VTCI 的确定最为合理。同时,结合关中平原各市的历年冬小麦产量统计数据对分布式 DCVW 估产结果的精度进行评价,结果表明关中平原各市的产量估计结果与年鉴统计的产量较为接近,精度较高,进一步说明分布式 DCVW 获得的聚合 VTCI 应用于干旱影响评估的精度较高。分布式 DCVW 更适用于基于干旱对冬小麦生产及产量影响评估的区域指数空间尺度上推研究。

(2) 充分利用分布式 DCVW 在数据处理过程中考虑旱情信息的空间自相关性和空间变异性,能够有效检测地表旱情信息的主导特征和空间变异格局、过程的特性,解决了传统方法 WA 在聚合过程中易造成旱情信息损失的问题,为基于干旱影响评估和冬小麦估产的区域范围内的指数聚合提供了一种有效的方法。

参 考 文 献

- 周丹,张勃,任培贵,等. 基于标准化降水蒸散指数的陕西省近 50 a 干旱特征分析[J/OL]. 自然资源学报, 2014, 29(4): 677-688. <http://www.jnr.ac.cn/CN/abstract/abstract2839.shtml>. DOI: 10.11849/zrzyxb.2014.04.012.
ZHOU Dan, ZHANG Bo, REN Peigui, et al. Analysis of drought characteristics of Shaanxi Province in recent 50 years based on standardized precipitation evapotranspiration index [J/OL]. Journal of Natural Resources, 2014, 29(4): 677-688. (in Chinese)
- 郭晓鸽,庞奖励,史兴民,等. 关中平原近 50 年来气候生产力的变化及对植物影响研究[J]. 农业系统科学与综合研究, 2010, 26(4): 395-400.
GUO Xiaoge, PANG Jiangli, SHI Xingming, et al. Variation of climate productivity and its impact on plants in Guanzhong Plain for last 50 years [J]. System Sciences and Comprehensive Studies in Agriculture, 2010, 26(4): 395-400. (in Chinese)
- 白雪娇,王鹏新,解毅,等. 基于结构相似度的关中平原旱情空间分布特征[J/OL]. 农业机械学报, 2015, 46(11): 348-354. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20151147&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.11.047.
BAI Xuejiao, WANG Pengxin, XIE Yi, et al. Spatial distribution characteristics of droughts in Guanzhong Plain using the vegetation temperature condition index and structural similarity [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(11): 348-354. (in Chinese)
- 蔡明科. 关中地区水文、气象干旱特征对比研究[J]. 灌溉排水学报, 2003, 22(6): 33-37.
CAI Mingke. Comparative study on hydrologic-meteorological-drought characteristics of Guanzhong areas [J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2003, 22(6): 33-37. (in Chinese)
- 刘晓宇,贾忠华. 模糊综合评价在关中灌区干旱评价中的应用[J]. 水资源与水工程学报, 2005, 16(2): 62-65.
LIU Xiaoning, JIA Zhonghua. Fuzzy synthetic evaluating and its application in the establishment of the drought index in Guanzhong region [J]. Journal of Water and Resources and Water Engineering, 2005, 16(2): 62-65. (in Chinese)
- 谭学志,粟晓玲,邵东国. 基于 SPI 的陕西关中地区气象干旱空间特征分析[J]. 干旱地区农业研究, 2011, 29(2): 224-229.
TAN Xuezhi, SU Xiaoling, Shao Dongguo. Analysis of spatial and temporal characteristics of meteorological drought in Guanzhong

- region of Shaanxi Province [J]. *Agriculture Research in the Arid Areas*, 2011, 29(2): 224–229. (in Chinese)
- 7 BENEDETTI R, ROSSINI P. On the use of NDVI profiles as a tool for agricultural statistics: the case study of wheat yield estimate and forecast in Emilia Romagna [J]. *Remote Sensing of Environment*, 1993, 45(3): 311–326.
- 8 RASMUSSEN M S. Assessment of millet yields and production in northern Burkina Faso using integrated NDVI from the AVHRR [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 1992, 13(13): 3431–3442.
- 9 ANUP K P, CHAI L, SINGH R P, et al. Crop yield estimation model for Iowa using remote sensing and surface parameters [J]. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2006, 8(1): 26–33.
- 10 何亚娟, 潘学标, 裴志远, 等. 基于 SPOT 遥感数据的甘蔗叶面积指数反演和产量估算 [J/OL]. *农业机械学报*, 2013, 44(5): 226–231. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20130539&flag=1. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2013.05.039.
- HE Yajuan, PAN Xuebiao, PEI Zhiyuan, et al. Estimation of LAI and yield of sugarcane based on SPOT remote sensing data [J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2013, 44(5): 226–231. (in Chinese)
- 11 高中灵, 徐新刚, 王纪华, 等. 基于时间序列 NDVI 相似性分析的棉花估产 [J/OL]. *农业工程学报*, 2012, 28(2): 148–153. http://www.tcsae.org/nygxcb/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20120226&journal_id=nygxcb. DOI: 10.3969/j.issn.1002-6819.2012.02.026.
- GAO Zhongling, XU Xin'gang, WANG Jihua, et al. Cotton yield estimation based on similarity analysis of time-series NDVI [J/OL]. *Transactions of the CSAE*, 2012, 28(2): 148–153. (in Chinese)
- 12 田苗, 王鹏新, 张树誉, 等. 基于条件植被温度指数的冬小麦产量预测 [J/OL]. *农业机械学报*, 2014, 45(2): 239–245. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20140240&flag=1. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2014.02.040.
- TIAN Miao, WANG Pengxin, ZHANG Shuyu, et al. Winter wheat yield forecasting based on vegetation temperature condition index [J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2014, 45(2): 239–245. (in Chinese)
- 13 AMRHEIN C G. Searching for the elusive aggregation effect: evidence from statistical simulations [J]. *Environment and Planning A*, 1995, 27(1): 105–119.
- 14 WOODCOCK C E, STRAHLER A H. The factor of scale in remote sensing [J]. *Remote Sensing of Environment*, 1987, 21(3): 311–332.
- 15 MARCEAU D J, HAY G J. Remote sensing contributions to the scale issue [J]. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 1999, 25(4): 357–366.
- 16 马玉平, 孙琳丽, 俄有浩, 等. 预测未来 40 年气候变化对我国玉米产量的影响 [J]. *应用生态学报*, 2015, 26(1): 224–232.
- MA Yuping, SUN Linli, E Youhao, et al. Predicting the impact of climate change in the next 40 years on the yield of maize in China [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2015, 26(1): 224–232. (in Chinese)
- 17 杜灵通, 田庆久, 王磊, 等. 基于多源遥感数据的综合干旱监测模型构建 [J]. *农业工程学报*, 2014, 30(9): 126–132.
- DU Lingtong, TIAN Qingjiu, WANG Lei, et al. A synthesized drought monitoring model based on multi-source remote sensing data [J]. *Transactions of the CSAE*, 2014, 30(9): 126–132. (in Chinese)
- 18 赵捷, 徐宗学, 左德鹏, 等. 黑河上中游流域地表植被对干旱的响应 [J]. *北京师范大学学报: 自然科学版*, 2014(5): 543–548.
- ZHAO Jie, XU Zongxue, ZUO Depeng, et al. Vegetation response to meteorological drought in upper and middle reaches of the Heihe River basin [J]. *Journal of Beijing Normal University: Natural Science*, 2014(5): 543–548. (in Chinese)
- 19 李艳, 王鹏新, 刘峻明, 等. 基于条件植被温度指数的冬小麦主要生育时期干旱监测效果评价Ⅲ—干旱对冬小麦产量的影响评估 [J]. *干旱地区农业研究*, 2014, 32(5): 218–222.
- LI Yan, WANG Pengxin, LIU Junming, et al. Evaluation of drought monitoring effects in the main growing and development stages of winter wheat using the vegetation temperature condition index Ⅲ—impact evaluation of drought on winter wheat [J]. *Agriculture Research in the Arid Areas*, 2014, 32(5): 218–222. (in Chinese)
- 20 WANG G, GERTNER G, ANDERSON A B. Up-scaling methods based on variability-weighting and simulation for inferring spatial information across scales [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2004, 25(22): 4961–4979.
- 21 HAY G J, NIERNANN K O, GOODENOUGH D G. Spatial thresholds, image-objects, and upscaling: a multiscale evaluation [J]. *Remote Sensing of Environment*, 1997, 62(1): 1–19.
- 22 ATKINSON P M, CURRAN P J. Choosing an appropriate spatial resolution for remote sensing investigations [J]. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 1997, 63(12): 1345–1351.
- 23 PATEL N R, PARIDA B R, VENUS V, et al. Analysis of agricultural drought using vegetation temperature condition index (VTCI) from Terra/MODIS satellite data [J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2012, 184(12): 7153–7163.
- 24 苏涛, 王鹏新, 刘翔舸, 等. 基于熵值组合预测和多时相遥感的春玉米估产 [J]. *农业机械学报*, 2011, 42(1): 186–192.
- SU Tao, WANG Pengxin, LIU Xiangge, et al. Spring maize yield estimation based on combination of forecasting of entropy method and multi-temporal remotely sensed data [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2011, 42(1): 186–192. (in Chinese)
- 25 王蕾. 基于条件植被温度指数的冬小麦生育时期干旱影响评估研究 [D]. 北京: 中国农业大学, 2015.
- WANG Lei. Estimation of drought impact on the main growth stage of winter wheat based on vegetation temperature condition index [D]. Beijing: China Agricultural University, 2015. (in Chinese)
- 26 王鹏新, 龚健雅, 李小文. 条件植被温度指数及其在干旱监测中的应用 [J]. *武汉大学学报: 信息科学版*, 2001, 26(5): 412–418.
- WANG Pengxin, GONG Jianya, LI Xiaowen. Vegetation temperature condition index and its application for drought monitoring [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2001, 26(5): 412–418. (in Chinese)
- 27 孙威, 王鹏新, 韩丽娟, 等. 条件植被温度指数干旱监测方法的完善 [J]. *农业工程学报*, 2006, 22(2): 22–26.