

DOI: 10.11766/trxb201806060230

基于地理加权回归的小麦测土配方施肥效果空间分析^{*}

巫振富¹ 赵彦锋² 程道全³ 陈杰^{2†}

(1 郑州大学公共管理学院, 郑州 450001)

(2 郑州大学农学院, 郑州 450001)

(3 河南省土壤肥料站, 郑州 450002)

摘要 测土配方施肥增产、增收效果的空间分异状况, 是因地制宜校正配方施肥技术参数、优化肥料配方的科学依据。收集整理南阳市296个小麦测土配方施肥“三区示范”田间试验点数据, 在施肥量空间化估算和小麦产量—施肥量地理加权回归(GWR)模型构建的基础上, 分析评价不同空间位置测土配方施肥相较于传统施肥模式的增产、增收效果。结果显示, 两种施肥模式下研究区小麦产量空间分布格局相似, 测土配方施肥将小麦产量由传统施肥模式的5 970 kg·hm⁻²提升至6 672 kg·hm⁻², 平均增产率为11.76% (各县区市增产率幅度为7.04~17.91%), 平均增收1 232 Yuan·hm⁻² (各县区市增收幅度为713~1 672 Yuan·hm⁻²)。研究结果表明, 测土配方施肥效果空间分异明显, 增产、增收较高的区域分布在南召县、西峡县、镇平县、新野县和社旗县, 内乡县、唐河县和桐柏县的某些区域存在减产、减收现象; 测土配方施肥虽然可以在总体上提高研究区小麦产量, 但本区小麦产量的空间分布格局主要受立地条件、土壤条件和管理水平等区域性耕地基础地力要素制约。

关键词 测土配方施肥; 小麦产量; 耕地; 地理加权回归模型; 空间分析

中图分类号 S147 **文献标识码** A

20世纪80年代以来, 家庭联产承包责任制一直是我国最主要的农业生产经营模式, 随着农业科技水平、物质投入以及机械化程度的日益提高, 这一模式在规模化经营、精细化管理、资源高效利用等方面的不足逐步凸显。一直以来, 我国农业生产实践中肥料施用主要取决于当地农民的经验和习惯, 过施、偏施等盲目、不科学的施肥现象相当普遍^[1]。大力推广测土配方施肥等科学施肥模式, 是提高我国肥料利用率、降低农业生产成本、改善农业生态环境、促进农业可持续发展的必由之路^[2-8]。科学评价和系统分析测土配方施肥效果, 是在全国广大范围内推广这一新型施肥模式的前提, 是校正技术参数、优化

肥料配方的基础, 具有极为重要的现实与实践意义。

测土配方施肥效果评价包括直接效果评价^[9-17]和间接效果^[18-22]评价, 前者通过综合比较分析不同施肥模式的肥料投入、肥料利用率、作物产量、作物产值等一系列指标, 从增产、增收等角度评价测土配方施肥的直接效果; 后者则基于肥料施用量、作物产值等数据, 通过构建计量模型, 以宏观视角分析和评价测土配方施肥在特定区域内的环境、经济和生态效益。上述相关研究基于离散的一定数量田间试验点位数据统计相关指标, 进而将指标统计结果扩展应用于整个案例区域。显然, 这种忽略统计关系空间非平稳性的指标统计结果, 只能

* 国家自然科学基金项目(40971128)资助 Supported by the National Natural Science Foundation of China (No.40971128)

† 通讯作者 Corresponding author, E-mail: jchen@zzu.edu.cn

作者简介: 巫振富(1988—), 男, 广西贺州人, 博士研究生, 主要从事土地资源管理、土壤空间预测与数字化制图方面的研究。E-mail: wfjt1988@163.com

收稿日期: 2018-06-06; 收到修改稿日期: 2018-10-09; 优先数字出版日期(www.cnki.net): 2018-11-09

在一定程度上反映配方施肥效果在案例区域的总体概况, 而不能准确揭示测土配方施肥效果的空间分异特征, 因此也无法作为因地制宜修正配方施肥各类技术参数的依据^[23]。

包括多元线性回归模型在内的总体统计模型成立的前提假设是观测值之间彼此独立, 在涉及空间问题时该假设常有悖于地理学第一定律: 地理事物或属性在空间上互为相关, 故总体统计模型通常不适用于空间非平稳性的统计关系研究。为了在回归研究中解决空间非平稳性问题, 探索因变量与自变量在空间范围内的相互关系, Fotheringham和Brunsdon等^[24-25]在局部回归的基础上提出了地理加权回归 (Geographically Weighted Regression, GWR), 将数据的空间属性嵌入线性回归模型中, 以此作为阐释空间关系非平稳性的途径。GWR技术面世以来, 来自农业、生态、环境等领域的大量应用案例^[26-28]表明, 其在空间数据分析、数字化制图表达较总体回归技术具有明显优势。

本研究收集整理南阳市296个小麦测土配方施肥“三区示范”田间试验点数据, 借助GWR技术阐释研究区范围内不同空间位置测土配方施肥相较于传统施肥模式的增产、增收效果, 旨在明晰测土配方施肥效果的空间分异状况, 促进测土配方施肥技术朝着精细化、量化的方向发展及应用。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

案例研究区南阳市位于河南省西南部豫、陕、鄂三省交界处(图1), 地理坐标 $110^{\circ}58'28''E \sim 113^{\circ}48'30''E$ 、 $32^{\circ}16'16''N \sim 33^{\circ}48'07''N$ 之间, 总面积 $2.66 \times 10^4 km^2$, 约占河南省总面积的16%, 是河南省面积最大、人口最多的省辖市, 境内地貌复杂, 包括山区、丘陵、平原等类型(图2)。该市地处亚热带与暖温带的过渡地带, 属季风大陆湿润半湿润气候, 年平均气温 $14.4 \sim 15.7^{\circ}C$, 四季分明; 年降水量 $703.6 \sim 1173 mm$, 空间上自东南向西北递减, 6、7、8月份降水量最大, 其中7月份多年月均降水量约占年均降水量的25%; 年日照时数 $1\,898 \sim 2\,121 h$, 无霜期 $220 \sim 245 d$ 。南阳市自然条件优越、自然资源丰富、农业历史悠久、农业基础雄厚, 素有“中州粮仓”之称, 是全国粮、棉、油、烟集中产地, 6个县市区是国家商品粮、棉基地, 3个县市区为国家优质棉基地。2017年全市耕地总面积 $8.837 \times 10^5 hm^2$, 耕作土壤以发育于低山丘陵及盆地边缘黄土母质、风化残积母质上的淋溶土(黄褐土)、发育于盆地中部平坦低洼区古河湖相沉积物的雏形土(砂姜黑土)以及发育于近现代河流冲积物上的新成土(潮土)等年轻土壤为主。2017年全年全市粮食作物种植面积 $1.191 \times 10^6 hm^2$, 其中小麦种植面积 $6.772 \times 10^5 hm^2$, 一年两熟, 一般为冬小麦—夏玉米轮作, 少部分为冬小麦—棉花、冬小麦—花生轮作。

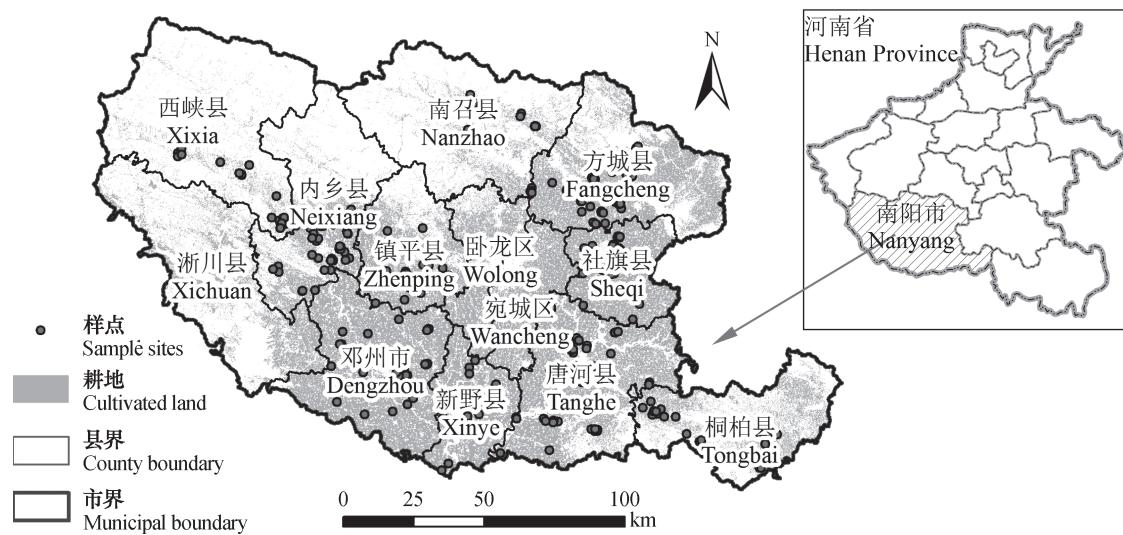


图1 南阳市地理位置及“三区示范”田间试验点空间分布

Fig.1 Location of Nanyang and distribution of field experiment sites for demonstration

1.2 数据来源

三区示范数据：“三区示范”试验是验证测土配方施肥实际效果的一种田间试验方法，所谓三区，系指空白对照区（不施肥处理）、传统施肥区（完全由农民按照当地习惯进行施肥管理）、配方施肥区（按照试验要求改变施肥数量和方式）。本研究数据来源于南阳市所辖各县农业局2005—2010年间在296个“三区示范”点开展的田间试验（图1），核心内容包括小麦产量和氮（N）、磷（P₂O₅）、钾（K₂O）施用量。

灌溉和排涝水平图、土壤类型图、土壤剖面性状图：根据南阳市各县农业部门用于耕地地力评价的相关数据综合制图得到（图2）。其中，土壤剖面性状作为南阳市耕地地力评价指标之一，包含NY/T 1634—2008规定的耕地地力评价因子集中的土体构型和障碍因素两类指标信息：对于潮土和风砂土选取土体构型进行评价，对于砂姜黑土和黄褐土等则主要选择影响耕地地力的土壤障碍因素（剖面中障碍层类型、位置及厚度）进行评价，如无障碍层，则按有效土层厚度（又称石质接触）来确定。

1.3 施肥量空间化估算

由于当前我国农业生产集约化程度不高、耕地破碎化严重，导致在区域尺度上很难准确获取每块耕地施肥量的详细信息。以往相关案例研究中，施肥量空间化估算通常采用由零维点空间到二维面空间的插值技术，无论是基于有限样点数据还是加入辅助变量的插值技术^[29-30]，其估算结果均为空间连续变异的施肥量，这明显与生产实践中以管理单元为基础确定施肥量的基本事实不符。而本研究提出的施肥量空间化估算是指基于有限“三区示范”田间试验点的施肥量数据，利用一系列技术手段，估计案例研究区不同空间位置耕地地块的施肥量。测土配方施肥“三区示范”田间试验一般以县级行政区为单位组织实施，从施肥指导单元确定到特定作物条件下肥料配方与施用量计算，均将耕地土壤条件作为核心决定因素之一。鉴于此，本研究以耕地土壤类型为基础进行小麦施肥量空间化估算，这里的土壤类型为更能体现农业生产性能的土壤分类基层单元，鉴于中国系统分类基层单元尚不完善，本研究选用土壤发生分类基层单元—土属。具体步骤为：

（1）将县级行政区划图、土壤类型图、耕地分布图叠加，生成施肥量空间化单元。（2）以县

级行政区为单位，基于“三区示范”田间试验点数据统计不同土属耕地的平均施肥量，将其作为该县对应土属的施肥量空间化单元的施肥量；如果某土属分布区无“三区示范”田间试验点，则以该县全部试验点的平均施肥量作为该土属的施肥量空间化单元的施肥量。（3）如果某县级行政区未布设“三区示范”田间试验点，则以整个研究区全部296个“三区示范”田间试验点的平均施肥量作为该县施肥量空间化单元的施肥量。（4）为了便于后续测土配方施肥效果评价过程中的各类计算，将赋值后的施肥量空间化单元输出为100 m×100 m分辨率的栅格图。

1.4 小麦产量—施肥量地理加权回归

对于某一空间位置（ μ_i, v_i ），小麦产量—施肥量GWR模型表达式为：

$$y_i = \beta_0(\mu_i, v_i) + \sum_{j=1}^k \beta_j(\mu_i, v_i)x_{ij} + \varepsilon_i \quad (1)$$

式中， y_i 为位置（ μ_i, v_i ）的小麦产量预测值， $\beta_0(\mu_i, v_i)$ 、 $\beta_j(\mu_i, v_i)$ 、 x_{ij} 、 ε_i 分别表示该空间位置的截距项、第j个自变量（即肥料养分氮、磷、钾施用量）的回归系数、第j个自变量的值、随机误差， k 为自变量的个数（本研究 $k=3$ ）。

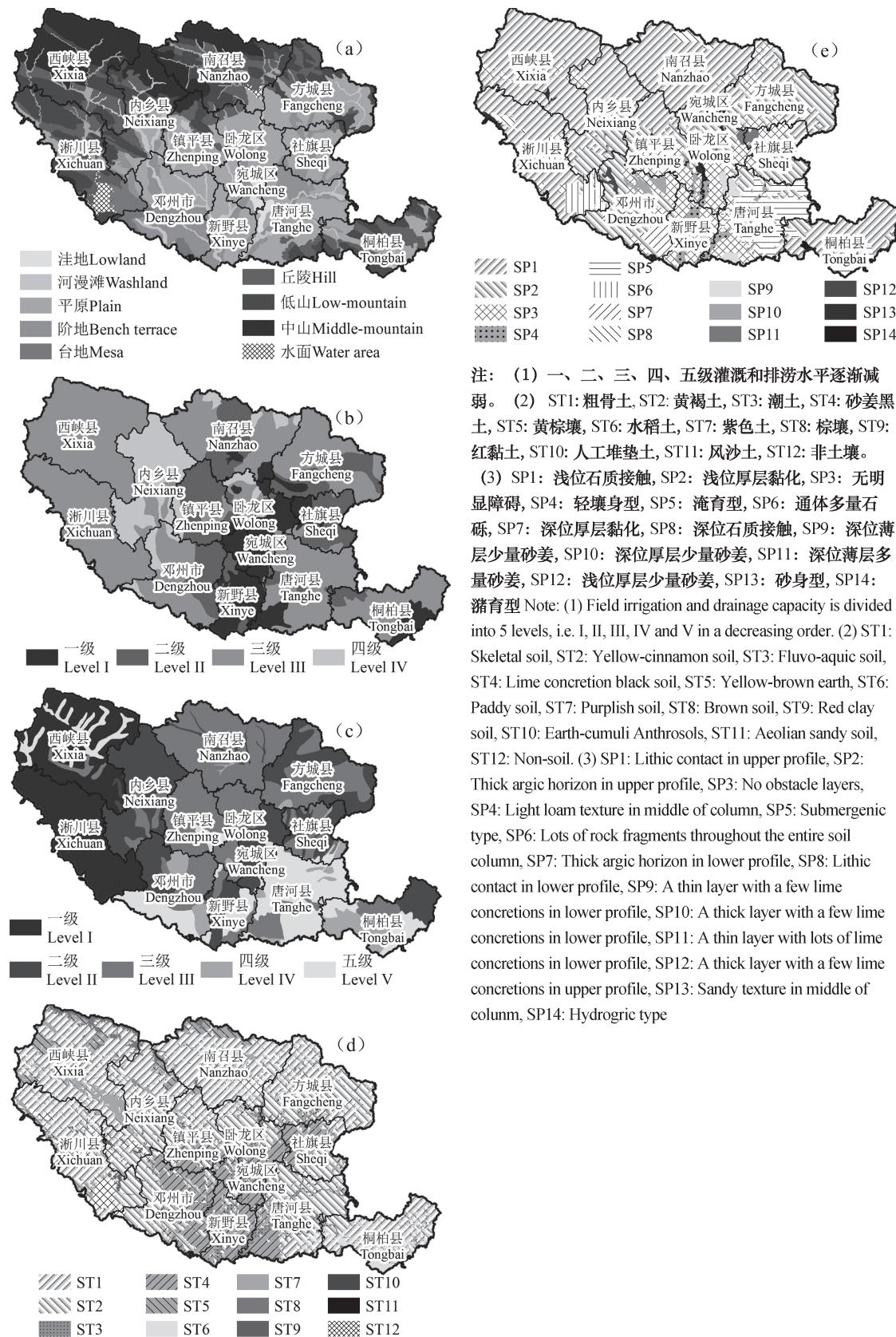
以“三区示范”田间试验点数据代入式（1）构建小麦产量—施肥量GWR模型，空间位置（ μ_i, v_i ）处的 $\beta_0(\mu_i, v_i)$ 、 $\beta_j(\mu_i, v_i)$ 、 ε_i 等各项回归参数由周围一定邻域范围的“三区示范”田间试验点数据按照不同权重计算得到，用以表征该位置小麦产量与施肥量之间的相互关系。各项回归参数在空间上的连续性在一定程度上反映了小麦产量与施肥量之间关系随空间变化的客观事实，结合施肥量空间化单元的施肥量数据计算得到各单元小麦产量GWR模型预测值，即小麦预测产量空间分布图。为了便于后续计算，将该产量预测值输出为100 m×100 m分辨率的栅格图。

1.5 测土配方施肥效果评价指标

选取小麦增产率、增收幅度两个指标作为测土配方施肥效果的评价指标。小麦增产率指测土配方施肥条件下的小麦产量与传统施肥条件下小麦产量的差值相对于传统施肥条件下产量的百分数，即：

$$r = \frac{y_1 - y_2}{y_2} \times 100\% \quad (2)$$

式中， r 为小麦增产率， y_1 为测土配方施肥条件下



注: (1) 一、二、三、四、五级灌溉和排涝水平逐渐减弱。 (2) ST1: 粗骨土, ST2: 黄褐土, ST3: 潮土, ST4: 砂姜黑土, ST5: 黄棕壤, ST6: 水稻土, ST7: 紫色土, ST8: 棕壤, ST9: 红黏土, ST10: 人工堆垫土, ST11: 风沙土, ST12: 非土壤。

(3) SP1: 浅位石质接触, SP2: 浅位厚层黏化, SP3: 无明显障碍, SP4: 轻壤身型, SP5: 淹育型, SP6: 通体多量石砾, SP7: 深位厚层黏化, SP8: 深位石质接触, SP9: 深位薄层少量砂姜, SP10: 深位厚层少量砂姜, SP11: 深位薄层多量砂姜, SP12: 浅位厚层少量砂姜, SP13: 砂身型, SP14: 潜育型 Note: (1) Field irrigation and drainage capacity is divided into 5 levels, i.e. I, II, III, IV and V in a decreasing order. (2) ST1: Skeletal soil, ST2: Yellow-cinnamon soil, ST3: Fluvo-aquic soil, ST4: Lime concretion black soil, ST5: Yellow-brown earth, ST6: Paddy soil, ST7: Purplish soil, ST8: Brown soil, ST9: Red clay soil, ST10: Earth-cumuli Anthrosols, ST11: Aeolian sandy soil, ST12: Non-soil. (3) SP1: Lithic contact in upper profile, SP2: Thick argic horizon in upper profile, SP3: No obstacle layers, SP4: Light loam texture in middle of column, SP5: Submergic type, SP6: Lots of rock fragments throughout the entire soil column, SP7: Thick argic horizon in lower profile, SP8: Lithic contact in lower profile, SP9: A thin layer with a few lime concretions in lower profile, SP10: A thick layer with a few lime concretions in lower profile, SP11: A thin layer with lots of lime concretions in lower profile, SP12: A thick layer with a few lime concretions in upper profile, SP13: Sandy texture in middle of column, SP14: Hydrogenic type

图2 南阳市地貌类型 (a)、灌溉水平 (b)、排涝水平 (c)、土壤类型 (d) 和土壤剖面性状 (e)

Fig. 2 Geomorphic type (a), irrigation level (b), drainage level (c), soil type (d) and soil profile property (e) in Nanyang City

小麦产量, y_2 为传统施肥条件下小麦产量。

增收幅度指测土配方施肥模式较传统施肥方式获取经济收益的增加值, 即:

$$i = (y_1 - y_2) \times p_y \cdot (c_1 - c_2) \times p_c \quad (3)$$

式中, i 为增收幅度, y_1 和 y_2 分别为测土配方施肥与传统施肥条件下的小麦产量, P_y 为小麦单价, c_1 和 c_2 分别为测土配方施肥与传统施肥模式下的肥料施肥量, P_c 为肥料单价。

将以前述方法获取的100 m × 100 m分辨率的施肥量和小麦产量数据代入式(2)、式(3), 即得到小麦增产率和增收幅度指标的空间分布图, 以此可揭示研究区测土配方施肥效果空间分异状况。

2 结果与讨论

2.1 施肥量空间化估算结果

研究区各县区市296个“三区示范”田间试验

点各处理的施肥量统计数据见表1。在所有田间试验点中, 均设有配方施肥处理小区且配方施肥只有氮磷钾配施这一种处理模式, 但各试验点配方施肥的具体配比关系各有不同; 绝大多数田间试验点(248个)的传统施肥处理也为氮磷钾配施, 具体配比关系各不相同且较配方施肥配比关系变化大; 在少数田间试验点, 传统施肥处理布设了氮肥单施、氮磷配施两种配施模式。总体上, 配方施肥模式总施肥量大于传统施肥氮磷钾配施模式。其中, 氮、磷肥施用量差别不大, 配方施肥模式主要是显著提升了钾肥施用量, 约超出传统钾肥施肥量29%, 这主要是为了减缓耕地表层土壤钾素流失趋势, 王宜伦等^[31]研究指出, 在第二次土壤普查至测土配方施肥项目开始实施期间(1980—2005年), 受当地农民耕作、施肥等影响, 南阳市耕地表层土壤速效钾下降了50.1%, 平均每年下降3.06 mg·kg⁻¹。

表1 “三区示范”田间试验点施肥量统计特征

Table 1 Statistical characteristics of fertilizer application rate in the demonstrational experiment sites

施肥模式 Fertilization models	施肥处理 Treatment	试验点 Samples	氮肥施用量 N application rate		磷肥施用量 P ₂ O ₅ application rate		钾肥施用量 K ₂ O application rate	
			平均值Mean / (kg·hm ⁻²)	变异系数 CV/%	平均值Mean/ (kg·hm ⁻²)	变异系数 CV/%	平均值Mean / (kg·hm ⁻²)	变异系数 CV/%
传统施肥 Conventional fertilization	T-N	20	207	27	—	—	—	—
	T-NP	28	165	16	69	43	—	—
	T-NPK	248	170	23	74	31	63	40
	小计 Subtotal	296	172	24	69	41	53	63
配方施肥 Formulated fertilization	T-NPK	296	170	14	75	30	81	26

注: T-N: 氮肥单施; T-NP: 氮磷配施; T-NPK: 氮磷钾配施, 下同 Note: T-N means application of N fertilizer alone, T-NP means combined application of N and P₂O₅ fertilizers, T-NPK means combined application of N, P₂O₅ and K₂O fertilizers. The same below

如按“三区示范”田间试验的施肥参数推广至各区域, 研究区施肥量空间化估算结果见图3、表2。对比可见, 研究区配方施肥将传统施肥模式下氮、磷、钾平均施肥量170、69、56 kg·hm⁻²分别调整为170、75、82 kg·hm⁻², 可见在研究区耕地表层土壤钾素长期持续下降的趋势背景下, 当地县区农技人员为“藏钾于地、保育肥力”, 在测土

配方施肥实施初期采取了增施钾肥的措施。从空间上看, 相对于传统施肥模式, 配方施肥模式在新野县、社旗县以及镇平县提高了氮肥施用量, 在桐柏县、内乡县降低了氮肥施用量; 在镇平县、唐河县提高了磷肥施用量, 在社旗县、桐柏县降低了磷肥施用量; 在桐柏县、邓州市、宛城区等各县提高了钾肥施用量。

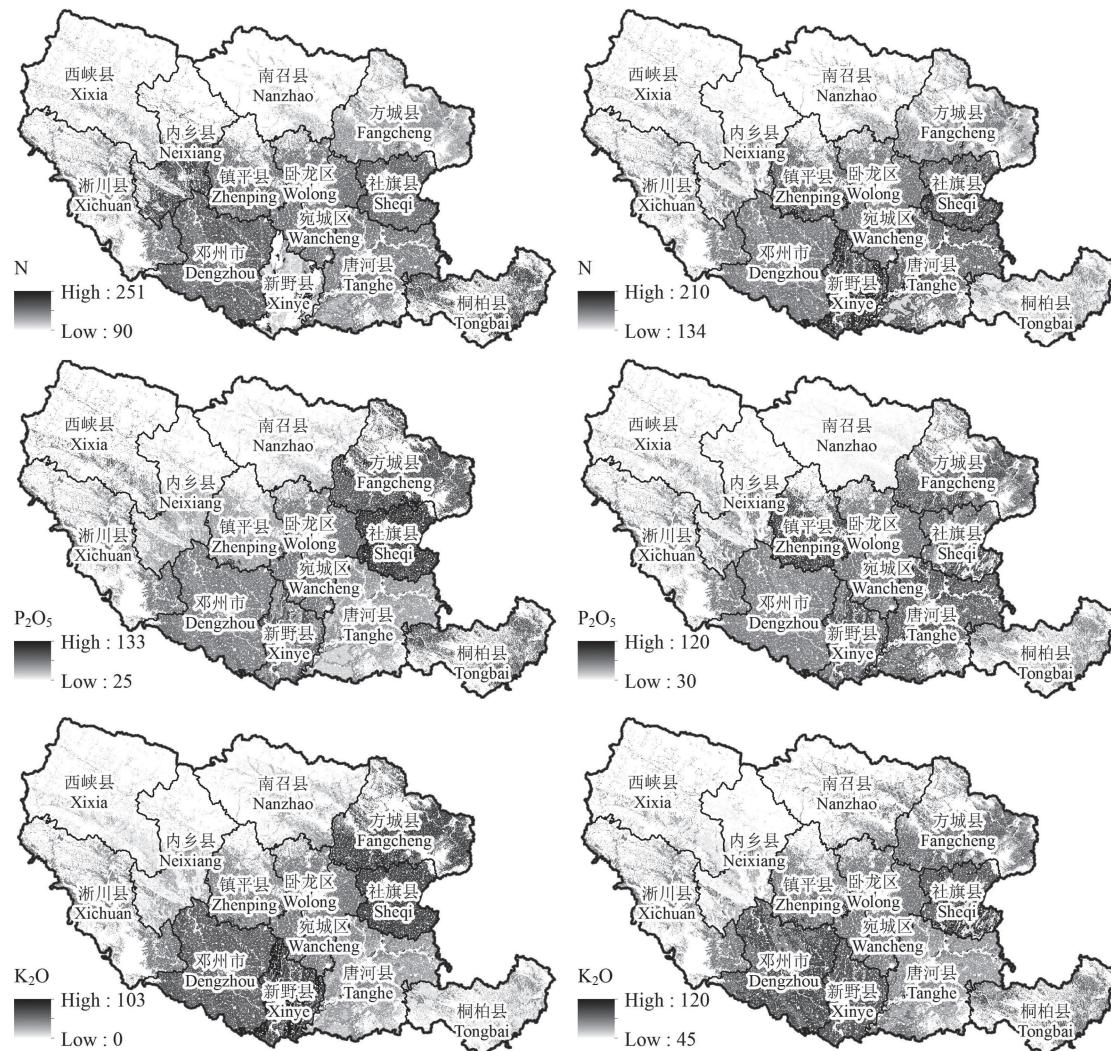


图3 传统施肥(左)与配方施肥(右)施肥量/($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)空间化估算结果

Fig.3 Spatialized estimation of application rate /($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$) for conventional fertilization (left) and formulated fertilization (right)

表2 各行政区施肥量空间化估算结果平均值

Table 2 Mean spatialized estimation of fertilizer application rate relative to region

行政区 Administrative region	传统施肥模式施肥量 Fertilizer application rate for conventional fertilization / ($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)			配方施肥模式施肥量 Fertilizer application rate for formulated fertilization / ($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)		
	氮N N	磷P₂O₅ P_2O_5	钾K₂O K_2O	氮N N	磷P₂O₅ P_2O_5	钾K₂O K_2O
	宛城区 Wancheng	173	69	53	170	75
卧龙区 Wolong	173	69	53	170	75	81
南召县 Nanzhao	128	45	34	152	48	83
方城县 Fangcheng	152	90	75	161	80	81
西峡县 Xixia	161	83	27	165	70	75
镇平县 Zhenping	175	57	49	180	92	81
内乡县 Neixiang	196	53	29	156	63	62
淅川县 Xichuan	173	69	53	170	75	81

续表

行政区 Administrative region	传统施肥模式施肥量 Fertilizer application rate for conventional fertilization / (kg·hm ⁻²)			配方施肥模式施肥量 Fertilizer application rate for formulated fertilization / (kg·hm ⁻²)		
	氮N	磷P ₂ O ₅	钾K ₂ O	氮N	磷P ₂ O ₅	钾K ₂ O
	社旗县 Sheqi	178	95	80	182	68
唐河县 Tanghe	167	53	39	176	84	76
新野县 Xinye	147	70	85	190	80	90
桐柏县 Tongbai	202	84	31	159	71	85
邓州市 Dengzhou	181	66	66	169	72	90
全市 The whole city	170	69	56	170	75	82

2.2 小麦产量空间变异

296个“三区示范”田间试验点传统施肥和配方施肥处理区小麦平均产量分别为5 865 kg·hm⁻²和6 585 kg·hm⁻²(表3)，与传统施肥模式相比，配

方施肥显著提高了小麦产量。此外，配方施肥模式下田间试验点之间小麦产量变异系数较传统施肥模式降低，可能是由于配方施肥更能有效缓解不同区域耕地基础地力对小麦产量的制约作用。

表3 “三区示范”田间试验点小麦产量统计特征

Table 3 Statistical characteristics of wheat yields of the experiment sites

施肥模式 Fertilization models	施肥处理 Treatment	试验点 Samples	小麦产量 Wheat yield			
			最小值 Min/ (kg·hm ⁻²)	最大值 Max/ (kg·hm ⁻²)	平均值 Mean/ (kg·hm ⁻²)	变异系数 CV/%
传统施肥 Conventional fertilization	T-N	20	3 720	7 650	5 715A	19.16
	T-NP	28	2 415	9 015	5 550A	30.27
	T-NPK	248	3 000	8 835	5 910A	17.77
	小计 Subtotal	296	2 415	9 015	5 865A	19.18
配方施肥 Formulated fertilization	T-NPK	296	3 150	9 780	6 585B	17.77

注：大写字母表示0.01水平上差异；相同字母表示差异不显著
Note: Capital letters indicate significant difference at 0.01 level, and not significant when the letters are the same

以“三区示范”田间试验点施肥量为自变量，分别应用普通最小二乘(ordinary least square, OLS)和GWR回归模型对研究区小麦产量实施预测，对预测产量以“三区示范”试验点小麦产量实测值进行检验，小麦产量预测值与田间试验实测值关系散点图显示，GWR模型能更加准确地模拟试验点小麦产量的高低分布趋势(图4)。在只考虑施肥量这一个自变量的情况下，GWR模型对配方施肥和传统施肥模式下小麦产量的拟合度R²分别达到0.419和0.263，显著高于OLS模型。根据GWR模型预测结果(图5)，传统施肥和配方施肥模式

下小麦平均预测产量分别为5 970 kg·hm⁻²(变幅4 704 kg·hm⁻²~6 800 kg·hm⁻²)和6 672 kg·hm⁻²(变幅4 888 kg hm⁻²~8 018 kg hm⁻²)，配方施肥显著提高了研究区小麦产量。

需要特别指出的是，配方施肥模式下小麦产量虽然总体显著提高，但空间分布格局相对于传统施肥模式下并未发生明显改变。对比分析研究区小麦产量空间分布(图5)与地貌类型、灌溉水平、排涝水平、土壤类型、土壤剖面性状(图2)可知：(1)小麦产量较高的耕地分布在光、温、水、肥等立地条件较好的平原和阶地(如新野县、

唐河县等), 这些区域灌溉水平较高, 土壤类型主要为潮土、砂姜黑土, 土壤剖面性状为深位薄层少量砂姜、轻壤身型或无明显土壤障碍等。(2) 产量较低的耕地则分布在立地条件较差的山地丘陵区域(如南召县、内乡县等), 这些区域灌溉水平较低, 土壤类型主要为黄棕壤、粗骨土, 土壤剖面性状为浅位石质接触、通体多量石砾或浅位厚层黏化等。(3) 小麦产量高低与排涝能力强弱无明显对应关系。南阳市砂姜黑土分布于新野县等低

洼区域, 质地黏重, 易渍涝, 而本文中排涝能力对小麦产量影响并不明显, 一方面可能归功于农田水利设施的普遍改善, 此外则是因为冬小麦生长周期(一般为10月至次年5月)与主要降水月份(6、7、8月)^[32]不一致, 本文相关田间试验开展期间未发生严重涝灾。上述分析表明, 施肥因素之外, 立地条件、土壤条件和管理水平等区域性耕地基础地力要素仍然是小麦产量的核心制约因素。

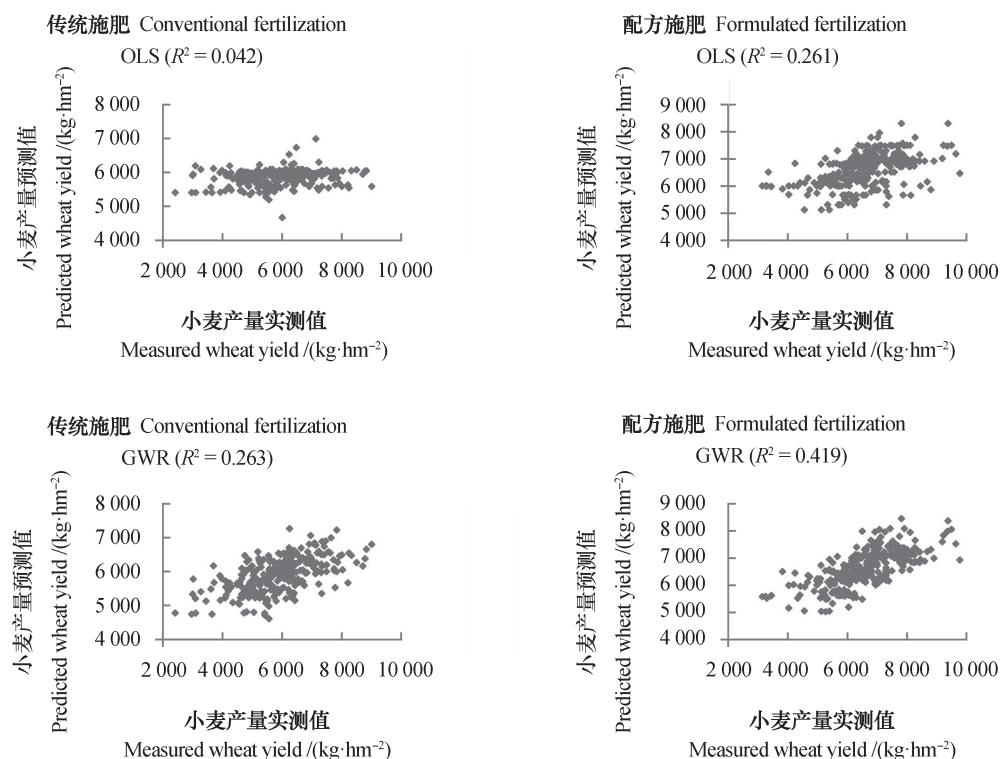


图4 “三区示范”田间试验点小麦产量预测值与实测值散点图

Fig.4 Scattergraph of predicted and measured wheat yields of the experiment sites

2.3 配方施肥效果空间分析

参照2005年—2010年当地小麦和化肥市场行情, 小麦单价以 $1.96 \text{ Yuan} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、各类化肥折合纯养分单价分别以氮 $3.5 \text{ Yuan} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、磷 $3.7 \text{ Yuan} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和钾 $4.6 \text{ Yuan} \cdot \text{kg}^{-1}$ 计, 应用本研究相关计算方法得出的研究区测土配方施肥相较于传统施肥的小麦增产率和经济增收效果空间分异特征如图6、表4所示。研究区耕地配方施肥模式下全市小麦平均增产 $702 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 、平均增产率 11.76% , 平均增收幅度 $1 232 \text{ Yuan} \cdot \text{hm}^{-2}$, 与白由路等^[33]研究得出的全国实验示范样点测土配方施肥小麦

平均增产率(12.6%)和高建友等^[34]分析的新野县配方施肥增收($1227.1 \text{ Yuan} \cdot \text{hm}^{-2}$)基本一致。研究区小麦测土配方施肥产量增产和经济增收效果空间分异明显, 各县区配方施肥增产率幅度为 $7.04\% \sim 17.91\%$, 增收幅度在 $713 \sim 1 672 \text{ Yuan} \cdot \text{hm}^{-2}$ 之间, 增产率和增收幅度较高区域主要分布在南召县、西峡县、镇平县、新野县和社旗县。此外, 内乡县、唐河县和桐柏县的某些区域增产率和增收值为负值, 即存在减产、减收现象, 这些区域应作为后续肥料配方优化的重点研究区域。

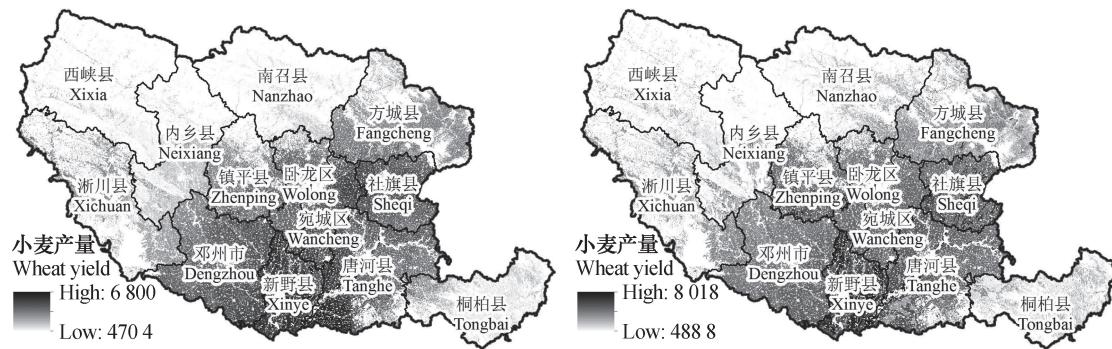
图5 传统施肥(左)与配方施肥(右)小麦预测产量/($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)空间分布图

Fig.5 Spatial distribution of predicted wheat yields /($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$) for conventional fertilization (left) and formulated fertilization (right)

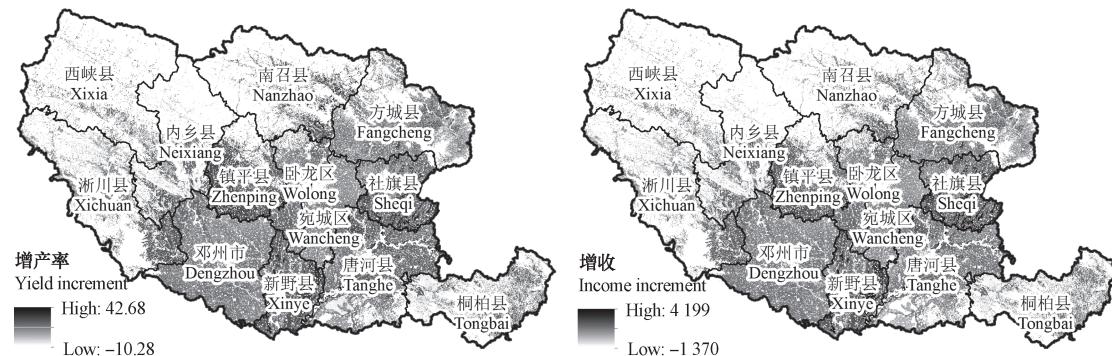
图6 配方施肥模式下小麦增产率/ (%) (左) 和经济增收幅度/ ($\text{Yuan}\cdot\text{hm}^{-2}$) (右) 空间分异

Fig.6 Spatial variation of yield increment / (%) (left) and income increment / ($\text{Yuan}\cdot\text{hm}^{-2}$) (right) with formulated fertilization

表4 配方施肥模式下各行政区小麦增产率和经济增收幅度统计

Table 4 Statistical characteristics of yield increment and income increment of formulated fertilization relative to administrative region

行政区 Administrative region	增产率 Increasing ratio of yield / %				增收幅度 Increasing income / ($\text{Yuan}\cdot\text{hm}^{-2}$)			
	最小值 Min		最大值 Max		平均值 Mean		最小值 Min	
	Mean	Max	Min	Mean	Max	Min	Max	Min
宛城区 Wancheng	5.16	11.92	9.02	9.02	508	1 251	963	963
卧龙区 Wolong	7.73	15.78	11.42	11.42	830	1 624	1 217	1 217
南召县 Nanzhao	5.83	30.49	17.91	17.91	202	2 608	1 522	1 522
方城县 Fangcheng	2.77	25.55	10.01	10.01	403	2 716	1 116	1 116
西峡县 Xixia	8.58	32.14	16.58	16.58	782	3 012	1 520	1 520
镇平县 Zhenping	11.21	25.75	16.48	16.48	1 052	2 684	1 624	1 624
内乡县 Neixiang	-7.89	24.59	7.04	7.04	-795	2 439	713	713
淅川县 Xichuan	7.58	16.16	12.19	12.19	741	1 690	1 228	1 228
社旗县 Sheqi	5.93	26.58	13.37	13.37	798	3 300	1 672	1 672
唐河县 Tanghe	-4.49	42.68	11.90	11.90	-876	4 199	1 115	1 115
新野县 Xinye	9.44	24.78	14.60	14.60	845	3 251	1 635	1 635
桐柏县 Tongbai	-10.28	21.87	10.49	10.49	-1 370	2 177	1 040	1 040
邓州市 Dengzhou	4.81	14.51	9.92	9.92	599	1 517	1 099	1 099
全市 The whole city	-10.28	42.68	11.76	11.76	-1 370	4 199	1 232	1 232

3 结 论

测土配方施肥模式可使研究区小麦平均产量由传统施肥模式下的 $5\ 970\ kg\cdot hm^{-2}$ 提升至 $6\ 672\ kg\cdot hm^{-2}$, 但并未从根本上改变小麦产量的空间分布格局, 立地条件、土壤条件和管理水平等区域性耕地基础地力要素仍然是小麦产量空间分布格局的决定性因素。因此, 针对中低产田的农田整理, 应采取改善立地条件、消除(减)土壤障碍因子和完善灌溉设施的工程性改良措施, 以最大限度提升耕地基础地力, 进一步提升配方施肥效果。测土配方施肥相对于传统施肥的增产、增收效果空间分异明显, 测土配方施肥模式下研究区小麦平均增产率为11.76% (各县区市增产率幅度为7.04%~17.91%), 平均增收幅度为 $1\ 232\ Yuan\cdot hm^{-2}$ (各县区市增收幅度为 $713\sim 1\ 672\ Yuan\cdot hm^{-2}$), 增产、增收幅度较高的区域分布在南召县、西峡县、镇平县、新野县和社旗县, 内乡县、唐河县和桐柏县的某些区域存在减产、减收现象, 这些区域应作为后续肥料配方优化的重点研究区域。

参 考 文 献

- [1] 张定祥, 史学正, 周明江. 论精确农业与中国土壤信息化建设. 安徽农业大学学报, 2002, 29 (3) : 306—310
Zhang D X, Shi X Z, Zhou M J. Precision agriculture and soil information construction in China (In Chinese). Journal of Anhui Agricultural University, 2002, 29 (3) : 306—310
- [2] 程琨, 潘根兴, 张斌, 等. 测土配方施肥项目固碳减排计量方法学探讨. 农业环境科学学报, 2011, 30 (9) : 1803—1810
Cheng K, Pan G X, Zhang B, et al. Discussion on the methodology for quantifying carbon sequestration and reduction in greenhouse gas emission under recommended fertilization project (In Chinese). Journal of Agro-Environment Science, 2011, 30 (9) : 1803—1810
- [3] 钱卫飞, 徐巡军, 钱卫东, 等. 不同土壤类型水稻测土配方施肥对肥料利用率的影响. 江苏农业科学, 2013, 41 (1) : 83—85
Qian W F, Xu X J, Qian W D, et al. Effect of soil testing and formulated fertilization on fertilizer utilization rate in different soil types (In Chinese). Jiangsu Agricultural Sciences, 2013, 41 (1) : 83—85
- [4] 张成玉, 肖海峰. 我国测土配方施肥技术增收节支效果研究——基于江苏、吉林两省的实证分析. 农业技术经济, 2009 (2) : 44—51
Zhang C Y, Xiao H F. Study on the effect of soil testing and formula fertilization on increasing income and reducing expenditure in China-Based on the empirical analysis of Jiangsu and Jilin (In Chinese). Journal of Agrotechnical Economics, 2009 (2) : 44—51
- [5] 张锋, 韩会平. 农户采用测土配方施肥技术的增收节支效果分析. 江苏农业学报, 2012, 28 (6) : 1471—1475
Zhang F, Han H P. Economic effect of soil testing for formulated fertilization (In Chinese). Jiangsu Journal of Agricultural Sciences, 2012, 28 (6) : 1471—1475
- [6] 张卫红, 李玉娥, 秦晓波, 等. 应用生命周期法评价我国测土配方施肥项目减排效果. 农业环境科学学报, 2015, 34 (7) : 1422—1428
Zhang W H, Li Y E, Qin X B, et al. Evaluation of greenhouse gas emission reduction by balanced fertilization in China using life cycle assessment (In Chinese). Journal of Agro-Environment Science, 2015, 34 (7) : 1422—1428
- [7] 周大龙, 童海琴. 测土配方施肥的意义. 现代农业科技, 2009 (23) : 279, 282
Zhou D L, Tong H Q. Significance of formula fertilization for soil testing (In Chinese). Modern Agricultural Science and Technology, 2009 (23) : 279, 282
- [8] 朱筱婧, 李晓明, 张雪. 低碳农业背景下提高肥料利用率的技术途径. 江苏农业科学, 2010 (4) : 15—17
Zhu X J, Li X M, Zhang X. Technical approaches to improve fertilizer use efficiency with the context of low carbon agriculture (In Chinese). Jiangsu Agricultural Sciences, 2010 (4) : 15—17
- [9] 邓小强, 范贵国, 周世龙, 等. 玉米测土配方施肥效果分析. 耕作与栽培, 2011 (6) : 32—35
Deng X Q, Fan G G, Zhou S L, et al. Analysis on the effect of corn soil testing and formula fertilization (In Chinese). Tillage and Cultivation, 2011 (6) : 32—35
- [10] 范贵国, 邓小强, 张莉, 等. 县域测土配方施肥专家系统在玉米生产中的应用效果. 农业与技术, 2016, 36 (3) : 8—11
Fan G G, Deng X Q, Zhang L, et al. Application of expert system for soil testing and formulated

- fertilization in Maize Production (In Chinese). Agriculture and Technology, 2016, 36 (3) : 8—11
- [11] 魏玉光, 赵丽琴. 水稻测土配方施肥效果探究. 黑龙江农业科学, 2007 (2) : 37—39
- Wei Y G, Zhao L Q. Effects of formula fertilization by soil testing on rice (In Chinese). Heilongjiang Agricultural Sciences, 2007 (2) : 37—39
- [12] 吴国启, 李万源, 胡云光, 等. 早稻配方施肥效果及肥料利用率分析. 农业开发与装备, 2016 (7) : 78, 65
- Wu G Q, Li W Y, Hu Y G, et al. Effect of formula fertilization and analysis of fertilizer utilization ratio in early season rice (In Chinese). Agricultural Development & Equipments, 2016 (7) : 78, 65
- [13] 徐华丽. 长江流域油菜施肥状况调查及配方施肥效果研究. 武汉: 华中农业大学资源与环境学院, 2012
- Xu H L. Investigation on fertilization and effect of formulated fertilization of winter rapeseed in Yangtze River Basin (In Chinese). Wuhan: College of Resources and Environment, Huazhong Agricultural University, 2012
- [14] 余宗波, 童军, 黄和平, 等. 湖北省测土配方施肥效果评价报告. 湖北农业科学, 2010, 49 (S1) : 51—60
- Yu Z B, Tong J, Huang H P, et al. Evaluation report on the effect of soil testing and formulated fertilization in Hubei Province (In Chinese). Hubei Agricultural Sciences, 2010, 49 (S1) : 51—60
- [15] 赵佐平, 刘芬, 段敏, 等. 秦巴山区水稻油菜配方施肥效益分析. 长江流域资源与环境, 2017, 26 (1) : 74—81
- Zhao Z P, Liu F, Duan M, et al. Economic benefits of formulated fertilization of rice and rape in Qinba Mountain Area (In Chinese). Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2017, 26 (1) : 74—81
- [16] 周晓舟, 唐创业. 免耕抛栽水稻测土配方施肥效果分析. 作物杂志, 2008 (4) : 46—49
- Zhou X Z, Tang C Y. Effect of formula fertilization by soil testing on rice with no-tillage seedling-broadcast (In Chinese). Crops, 2008 (4) : 46—49
- [17] 周晓舟, 唐创业. 免耕秋玉米测土配方施肥效果分析. 安徽农业科学, 2008, 36 (13) : 5535—5536, 5539
- Zhou X Z, Tang C Y. Effect of formula fertilization by soil testing on autumn maize with plowing-free (In Chinese). Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2008, 36 (13) : 5535—5536, 5539
- [18] 罗小娟, 冯淑怡, 黄挺, 等. 测土配方施肥项目实施的环境和经济效果评价. 华中农业大学学报(社会科学版), 2014 (1) : 86—93
- Luo X J, Feng S Y, Huang T, et al. Assessment on environmental and economic effects of formula fertilization by soil testing project (In Chinese). Journal of Huazhong Agricultural University (Social Sciences Edition), 2014 (1) : 86—93
- [19] 罗小娟, 冯淑怡, 石晓平, 等. 太湖流域农户环境友好型技术采纳行为及其环境和经济效应评价——以测土配方施肥技术为例. 自然资源学报, 2013, 28 (11) : 1891—1902
- Luo X J, Feng S Y, Shi X P, et al. Farm households' adoption behavior of environment friendly technology and the evaluation of their environmental and economic effects in Taihu basin—Taking formula fertilization by soil testing technology as an example (In Chinese). Journal of Natural Resources, 2013, 28 (11) : 1891—1902
- [20] 曲品晶, 张可. 农业面源污染治理的政策效用评估——以江苏省海安县的测土配方施肥推广为例. 中国农村水利水电, 2015 (8) : 63—68
- Qu P P, Zhang K. Agricultural non-point source pollution controlling policy's utility evaluation based on environmental cost: A case study of soil testing and fertilizer recommendation technology in Hai'an county (In Chinese). China Rural Water and Hydropower, 2015 (8) : 63—68
- [21] 沈晓艳, 黄贤金, 钟太洋. 中国测土配方施肥技术应用的环境与经济效应评估. 农林经济管理学报, 2017, 16 (2) : 177—183
- Shen X Y, Huang X J, Zhong T Y. Environmental and economic evaluation of formula fertilization with soil testing technology in China (In Chinese). Journal of Agro-Forestry Economics and Management, 2017, 16 (2) : 177—183
- [22] 殷欣, 张明祥, 胡荣桂. 测土配方施肥对湖北省N₂O减排的贡献. 环境科学学报, 2016, 36 (4) : 1351—1358
- Yin X, Zhang M X, Hu R G. Contribution of soil testing for formulated fertilization to N₂O mitigation in Hubei Province (In Chinese). Acta Scientiae Circumstantiae, 2016, 36 (4) : 1351—1358
- [23] 陈强, 朱慧敏, 何溶, 等. 基于地理加权回归模型评估土地利用对地表水质的影响. 环境科学学报, 2015, 35 (5) : 1571—1580
- Chen Q, Zhu H M, He R, et al. Evaluating the impacts of land use on surface water quality using geographically weighted regression (In Chinese). Acta Scientiae Circumstantiae, 2015, 35 (5) : 1571—1580

- [24] Brunsdon C, Fotheringham A S, Charlton M E. Geographically weighted regression: A method for exploring spatial non-stationarity. *Geographical Analysis*, 1996, 28 (4) : 281—298
- [25] Fotheringham A S, Charlton M, Brunsdon C. The geography of parameter space: An investigation of spatial non-stationarity. *International Journal of Geographical Information Systems*, 1996, 10 (5) : 605—627
- [26] Imran M, Stein A, Zurita-Milla R. Using geographically weighted regression kriging for crop yield mapping in west africa. *International Journal of Geographical Information Science*, 2015, 29 (2) : 234—257
- [27] Widyaningsih P, Saputro D R S, Putri A N. Fisher scoring method for parameter estimation of geographically weighted ordinal logistic regression (gwolr) model//International conference on mathematics: Education, theory and application. 2017
- [28] 瞿明凯, 李卫东, 张传荣, 等. 地理加权回归及其在土壤和环境科学上的应用前景. *土壤*, 2014, 46 (1) : 15—22
- Qu M K, Li W D, Zhang C R, et al. Geographically weighted regression and its application prospect in soil and environmental sciences (In Chinese). *Soils*, 2014, 46 (1) : 15—22
- [29] 龙军, 张黎明, 沈金泉, 等. 复杂地貌类型区耕地土壤有机质空间插值方法研究. *土壤学报*, 2014, 51 (6) : 1270—1281
- Long J, Zhang L M, Shen J Q, et al. Spatial interpolation of soil organic matter in farmlands in areas complex in landform (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2014, 51 (6) : 1270—1281
- [30] 文雯, 周宝同, 汪亚峰, 等. 基于辅助环境变量的土壤有机碳空间插值——以黄土丘陵区小流域为例. *生态学报*, 2013, 33 (19) : 6389—6397
- Wen W, Zhou B T, Wang Y F, et al. Soil organic carbon interpolation based on auxiliary environmental covariates: A case study at small watershed scale in Loess Hilly region (In Chinese). *Acta Ecologica Sinica*, 2013, 33 (19) : 6389—6397
- [31] 王宜伦, 韩燕来, 谭金芳, 等. 南阳盆地施肥调查与土壤养分状况分析. *河南科学*, 2009, 27 (3) : 309—311
- Wang Y L, Han Y L, Tan J F, et al. Analyzing on fertilization investigation and soil nutrient conditions in the Nanyang Basin (In Chinese). *Henan Science*, 2009, 27 (3) : 309—311
- [32] 王铁军, 肖烨, 黄志刚, 等. 近40年南阳市降水量及降水类型分布特征. *南阳师范学院学报*, 2016, 15 (6) : 41—45
- Wang T J, Xiao Y, Huang Z G, et al. Distribution characteristics of precipitation amount and type of Nanyang city in recent 40 years (In Chinese). *Journal of Nanyang Normal University*, 2016, 15 (6) : 41—45
- [33] 白由路, 杨俐萍. 我国农业中的测土配方施肥. *土壤肥料*, 2006 (2) : 3—7
- Bai Y L, Yang L P. Soil testing and fertilizer recommendation in Chinese agriculture (In Chinese). *Soils and Fertilizers*, 2006 (2) : 3—7
- [34] 高建友, 刘听报. 冬小麦测土配方施肥方案设计与田间示范. *现代农业科技*, 2016 (14) : 14, 16
- Gao J Y, Liu T B. Design and field demonstration of soil testing and formulated fertilization for winter wheat (In Chinese). *Modern Agricultural Science and Technology*, 2016 (14) : 14, 16

Spatial Analysis of the Effect of Soil-Testing-Based-Formulated-Fertilization of Wheat Based on Geographically Weighted Regression

WU Zhenfu¹ ZHAO Yanfeng² CHENG Daoquan³ CHEN Jie^{2†}

(1 School of Public Administration, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China)

(2 School of Agricultural Sciences, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China)

(3 Station of Soil and Fertilizer Extension Service, Henan Province, Zhengzhou 450002, China)

Abstract [Objective] This study was conducted to investigate spatial variation of the effect of soil-testing-based-formulated-fertilization of wheat, as compared with conventional fertilization, in an attempt

to provide a scientific basis for adjusting technical parameters and optimizing fertilizer formula specifically for a farmland. 【Method】 Data were collected from 296 field experiment sites set for demonstration of soil-testing-based-formulated-fertilization (STBFF) of wheat in Nanyang city for analysis and evaluation of effects of STBFF on yield and income of wheat at various locations as compared with conventional fertilization, based on spatialized estimation of fertilization rate and modeling of geographically weighted regression (GWR) for relationship between wheat yield and fertilization rate. The spatial variation of the effect of STBFF of wheat, embodied by increment in wheat yield and income, was evaluated on the basis of the prediction of wheat yield and analysis of its spatial distribution pattern. 【Result】 The spatial distribution pattern of wheat yield of the STBFF was similar to that of the conventional fertilization. The wheat yield was increased from $5\ 970\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ to $6\ 672\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, when conventional fertilization was converted into STBFF, with an average increment of wheat yield being 11.76% (the increment varied with the county in the range of 7.04% ~ 17.91%) and an average increment of income being $1\ 232\ \text{Yuan}\cdot\text{hm}^{-2}$ (the increment varied with the county in the range of $713\ \text{Yuan}\cdot\text{hm}^{-2}$ ~ $1\ 672\ \text{Yuan}\cdot\text{hm}^{-2}$). 【Conclusion】 Spatial variation of the effects was quite obvious. The regions enjoying high increments of wheat yield and income were distributed mainly in Nanzhao, Xixia, Zhenping, Xinye and Sheqi counties, however, some regions in Neixiang, Tanghe and Tongbai counties suffered negative effects. Although STBFF can improve generally yield of the wheat in Nanyang city, the spatial distribution pattern of wheat yield in this area is affected by some factors like physical conditions, soil conditions and agricultural management level of a region.

Key words Soil-testing-based-formulated-fertilization (STBFF); Wheat yield; Cultivated land; Geographically Weighted Regression model; Spatial analysis

(责任编辑: 檀满枝)