

DOI: 10.11766/trxb201906250273

赵彦锋, 程道全, 巫振富, 陈杰, 孙笑梅, 闫军营, 梁思源. 基于空间分析的河南省小麦施肥问题诊断与地理优化[J]. 土壤学报, 2020, 57(5): 1206–1218.

ZHAO Yanfeng, CHENG Daoquan, WU Zhenfu, CHEN Jie, SUN Xiaomei, YAN Junying, LIANG Siyuan. Problem Diagnosis and Geographic Optimization for Fertilization of Wheat in Henan Province Based on Spatial Analysis [J]. Acta Pedologica Sinica, 2020, 57(5): 1206–1218.

基于空间分析的河南省小麦施肥问题诊断与地理优化*

赵彦锋¹, 程道全², 巫振富³, 陈杰¹, 孙笑梅², 闫军营², 梁思源³

(1. 郑州大学农学院, 郑州 450001; 2. 河南省土壤肥料站, 郑州 450002; 3. 郑州大学公共管理学院, 郑州 450001)

摘要: 基于河南小麦主产区 82 个县 2 277 个样点的“不施肥、习惯施肥、推荐施肥”对照试验数据, 在绘制小麦产量图、施肥量图、土壤养分图、肥料农学效率图基础上, 采用地图对比法揭示了该区域氮磷钾分配的主要问题; 采用随机森林法分析了土壤养分、施肥量、地理要素(气候和土壤类型)对小麦产量变异的影响力; 综合对照试验数据和多源文献, 确定该区适宜的小麦氮磷钾施用范围, 并按“以产定肥”、“因土施肥”原则进行施肥量地理优化。结果表明: 该区农民习惯施氮、磷量普遍偏大, 钾用量局部不足; 推荐方案中氮、磷用量未明显降低, 而钾普遍增加。两类施肥方式的共同问题是氮磷钾用量与小麦产量、土壤养分的空间匹配性欠佳。小麦产量变异的主导因素是土壤和气候资源的地理差异, 施肥的影响次之, 土壤养分的影响最低; 小麦增产量变异同时受地理因素和施肥因素的影响, 而与土壤养分丰缺无关; 施肥水平高是土壤养分丰缺与小麦产量关系较弱的主要原因。根据小麦产量和土壤养分丰缺, 确定氮磷钾优化施用量变化范围分别为 120~210 kg·hm⁻²、45~105 kg·hm⁻² 和 45~120 kg·hm⁻²; 按区域总量计, 氮磷钾优化施用量较地方专家推荐量分别节约 14.2%、40.0%和 39.5%, 较农民习惯用量分别节约 20.9%、41.1%和 17.5%。

关键词: 地图对比; 随机森林; 河南省; 小麦; 施肥优化

中图分类号: S159.9; S143 **文献标志码:** A

Problem Diagnosis and Geographic Optimization for Fertilization of Wheat in Henan Province Based on Spatial Analysis

ZHAO Yanfeng¹, CHENG Daoquan², WU Zhenfu³, CHEN Jie¹, SUN Xiaomei², YAN Junying², LIANG Siyuan³

(1. School of Agricultural Science, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China; 2. Station of Soil and Fertilizer Extension Service, Henan Province, Zhengzhou 450002, China; 3. School of Public Management, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China)

Abstract: 【Objective】 Variable rate fertilizing is an important way to improve fertilization economic efficiency and reduce adverse environmental effect. The objective of this paper is to make a diagnosis of the fertilization of wheat in Henan in an attempt to find out problems and to optimize application rates of NPK fertilizers in line with geographical change of wheat potential yield and soil properties. Henan Province is a major wheat cultivation area of China, contributing 25% of the total wheat production of the country. 【Method】 Funded by the formula fertilization project of the Ministry of Agriculture of China, the

* 国家自然科学基金项目(40801080, 41601210, 40971128)资助 Supported by the National Natural Science Foundation of China (Nos.40801080, 41601210 and 40971128)

作者简介: 赵彦锋(1977—), 男, 河南洛阳人, 博士, 副教授, 主要从事土壤地理和土地管理研究。E-mail: yfzhao@zzu.edu.cn

收稿日期: 2019-06-25; 收到修改稿日期: 2019-09-03; 优先数字出版日期(www.cnki.net): 2019-11-07

province launched extensively Three-Zone Comparison Experiments (TCE) during the years of 2007—2009. TCE had experimental sites set up all over the province. Each site was designed to have three adjoining plots, randomly selected and laid out for wheat cultivation under CK (no fertilization), CF (local farmer customary fertilization) and RF (fertilization recommended by local agricultural experts), separately. In this paper, data were collected from a total of 2277 TCE sites in 82 counties for comparison analysis. Before seeding of wheat, a soil sample was collected from the cultivated-layer of each plot, and then the samples from the three adjoining plots were mixed into one as soil sample of the site for analysis of OM, pH, total N, Olsen-P and readily available K. Wheat yield, NPK application rates of each plot and soil properties and accumulated sunshine hour, accumulated precipitation, accumulated evaporation, accumulated temperature above 0 °C and that above 10 °C of each TCE site, during the wheat growth period were all recorded separately for comprehensive analysis following the steps below. 1) mapping wheat yield, N, P, K application rate, contents of total N, available P and readily available K in soil with the aid of kriging interpolation, and comparing the maps to identify problems in application of N, P and K fertilizers in this area; 2) adopting the Random Forest (RF) method to assess relative contribution of soil properties of the cultivated soil layer, fertilization rate and geographical variation of soil type and climate to variation of wheat yield; and 3) superimposing the wheat potential yield map, soil total N map, soil available P map and soil readily available K map acquired in the research and referring to the research on soil nutrient sufficiency standard and recommendation of NPK application rates for targeted wheat yield to optimize fertilization recommendation geographically in line with the principles of “yield-targeted fertilization” and “soil-oriented fertilization” for the province. 【Result】 Results show that the customary application rates of N and P tended generally to be higher, while that of K to be lower in some areas. However, most of the fertilization recommendations failed to reduce the rates of N and P, but generally raise the rate of K application. The two fertilization schemes, customary and recommended, are found to share a common problem, i.e. N, P, and K application rates mismatched targeted wheat yield and soil fertility in spatial distribution. Random forest analysis shows that geographic variations of soil, type and climate were the dominant factors of the spatial variation of wheat yield, and fertilization followed the next and soil nutrients the last in effect, while variations of geographical factors and fertilization were the ones determining spatial variation of wheat yield increment, which had nothing to do with soil nutrients. High fertilization rates were the major reason explaining the weak relationship between soil nutrient status and wheat yield. 【Conclusion】 On the background of high nutrient and water supply, physical geographical distributions of soil type and climate now are the key factors determining spatial variation of wheat yield at a provincial scale. Owing to the hardness of breaking through the obstacle of soil type and the limitation of climate conditions, it is almost infeasible to alter the rule of spatial distribution significantly within next few years. Based on the spatial variations of potential wheat yield and soil nutrient level, the recommended N, P₂O₅ and K₂O application rate should be in the range of 120~210 kg·hm⁻², 45~105 kg·hm⁻² and 45~120 kg·hm⁻², respectively. It is estimated that geographic optimization may save N, P and K fertilizer by 14.2%, 40.0% and 39.5% over the fertilization schemes recommended by local experts and by 20.9%, 41.1% and 17.5% over the customary application rate of the local farmers.

Key words: Map comparison; Random forest; Henan Province; Wheat; Fertilization optimization

配方施肥是缓解粮食生产与环境保护矛盾的重要举措。随着各类肥效试验数据的增多^[1-13],近年来出现较大区域尺度的施肥配方研究^[3-13]。根据6个长期定位试验站数据,一些学者研究了华北小麦或小麦-玉米轮作体系适宜氮用量^[4-7]。基于我国小麦主产区近10年601个氮、288个磷和379个钾的肥效试验数据,Chuan等^[8]构建了小麦产量反应-肥料农学效率方程暨施肥专家模型。吴良全等^[10-11]将

全国分为四个大区、十二个亚区,在2005—2010年4232个小麦氮磷钾肥效试验基础上以线性回归模型计算各区最大效益施氮量和施钾量,根据“恒量监控法”推荐施磷量。Xu等^[13]总结2001—2015年全国玉米5893个肥效试验,计算各试验点养分需求量,进而以克里格插值制作区域推荐施肥量图。上述“大配方”研究表明了在全国尺度上施肥效果的差异,但由于分区范围大或者肥效试验点分布密度

低,其施肥量的地理适应性变化不够详细。

制定省域内的分区施肥配方无疑更利于指导施肥实践,但需要高密度的肥效实验数据为支撑。在“测土配方施肥”项目支持下,我国主要农业县市曾广泛开展“三区对照”示范试验,积累了大量数据,该数据目前未得到充分分析和应用。“三区对照”即对比不施肥、当地农民习惯施肥和地方专家推荐施肥下的作物产量反应,其目的是为当地农民提供合理施肥“示范”。三区对照试验布置的点位多,覆盖面广,但与标准的肥效实验数据相比:三区对照试验在空间上布局离散,缺乏可比的、统一的土壤基础;试验方案中无施肥水平划分;未设置重复试验。由于上述特点,推荐施肥效果的空间变异性较大,需要进一步评价和调整^[14];但“三区对照”试验数据的特点又决定了难以用统计回归和插值推绎局部最佳施肥量。

地图对比通过空间认知判断宏观事物变化规律与联系,能突破回归建模的应用限制;而近年来得到广泛应用的随机森林算法^[15-16]在定量解释空间现象的变异机制方面具有独特优势^[17-18]。本文结合上述两种方法分析河南省小麦主产区“三区对照”数据,旨在研究不同施肥方案下作物产量、施肥量、土壤养分、肥料农学效率等的空间变化与联系,评判施肥量丰缺及分配格局的合理性;并通过施肥、

土壤养分、土壤和气候等对小麦总产量和增产量变异的相对影响力分析,揭示肥效空间变异的机制;最后,综合对比多源文献,判断该区适宜的氮磷钾用量范围和土壤氮磷钾丰缺指标,按照“以产定肥”、“因土施肥”原则进行氮磷钾施肥量地理优化,并估算肥料减施的潜力。

1 材料与方法

1.1 研究区及研究数据

研究聚焦河南省东部平原和南阳盆地中心区,涉及82个农业县、区,面积9.23万km²,海拔高程小于200m。土壤类型包括潮土、砂姜黑土、褐土和黄褐土(图1a))。东部平原属于温带大陆性气候,南阳盆地属于北亚热带气候与温带大陆性气候过渡区;自北至南年均温12~15℃,降水量范围600~1000mm。研究数据主要包括:

(1)河南省小麦主产区2007—2009年“三区示范”试验数据。共有试验点位2277个,试验统一要求:每个点位包含不施肥、当地习惯施肥、推荐施肥等三个试验小区,小区面积大于等于200m²,不设重复。不施有机肥;化肥施用:磷钾肥作为底肥,氮肥按6:4或7:3的基肥和追肥比例施用。每个试验

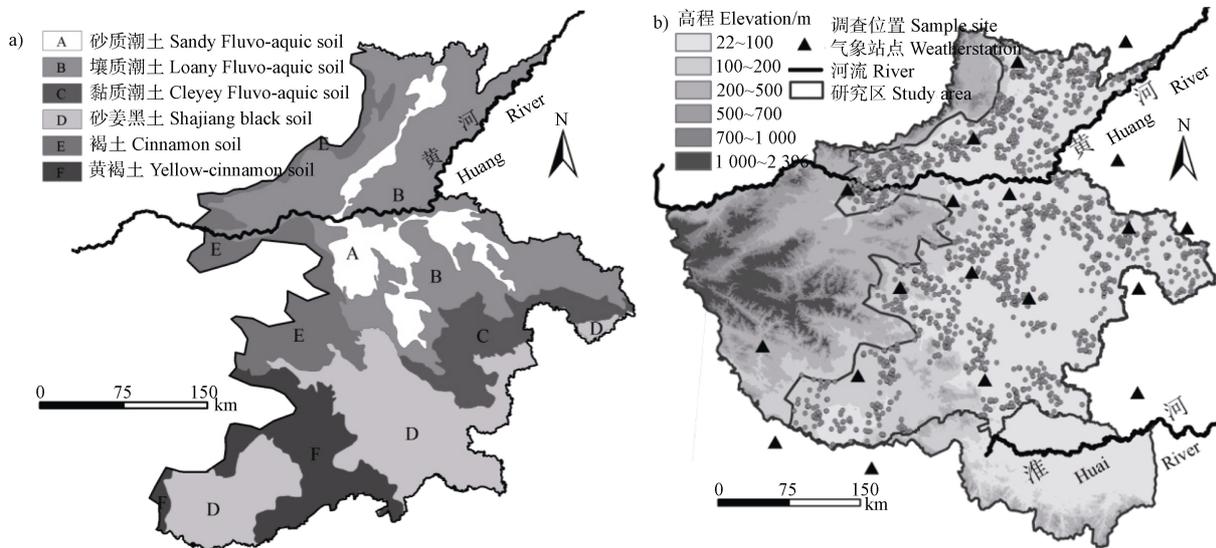


图1 研究区土壤类型(a)和试验点位置(b)

Fig. 1 Soil map of the study area (a) and field experiment sites (b)

点在小麦播种前采集一个混合土壤样，按照统一标准^[19]分析土壤有机质、pH、全氮、有效磷、速效钾含量。记录每个试验小区的氮、磷、钾施肥量；并在收获期通过亩穗数、穗粒数和千粒重抽样调查估算小麦产量。每个试验点在小麦生长期（10月—次年5月）的降水量、0℃以上积温、10℃以上积温、光照时数、蒸发量等参考最近的气象站数据，由中国地面气候资料日值数据集（V3.0）中的逐日气象资料（<http://data.cma.cn/site/index.html>）整理而得；共19个站点（图1b）。

研究数据涉及3个年份，但3个年份无异常气候现象；考虑到空间分析对数据量的要求，将3个年份的调查数据合并分析。

(2) 各县耕地土壤中存在障碍层的土壤资源面积比。将2013年耕地现状图与1:5万土壤图叠加，根据土种记录计算各县土壤资源中存在障碍层（砂土层、黏盘层、砂姜层、土层厚度低于50 cm）的耕地土壤面积比。

(3) 河南省统计年鉴2013—2017年的各县小麦平均产量数据^[20]。

(4) 2008—2017年各县化肥用量统计数据^[20]。

1.2 研究方法

1.2.1 地图对比 首先，按式(1)计算肥料农学效率，其中AEN、AEP和AEK分别代表氮、磷、钾的农学效率， $\text{kg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。Y代表施肥处理小麦产量， $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ； Y_0 代表不施肥处理小麦产量， $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ；F代表施肥量，分别用N、 P_2O_5 和 K_2O 折纯量表示， $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。

$$\text{AEN}(\text{AEP}, \text{AEK}) = (Y - Y_0) / F \quad (1)$$

其次，在变异函数分析基础上，通过克里格插值获取各变量地图。其中，专家推荐施磷量、土壤有效磷含量、农民习惯施氮量的农学效率、地方专家推荐施氮量和施磷量的农学效率等5个变量的偏基台值/基台值为0.17~0.25；而不施肥、习惯施肥、推荐施肥条件下的小麦产量，习惯施氮、磷、钾量，推荐施氮、钾量，土壤全氮、速效钾含量，习惯施磷量和施钾量的农学效率、推荐施钾量的农学效率等13个变量的偏基台值/基台值为0.25~0.63；上述数据符合普通克里格插值应用的条件。交叉检验表明，克里格预测值与实测值皮尔森（Pearson）相关系数为0.38~0.70，均达到极显著水平，结果能较

好地表征各要素宏观变异规律。

再次，进行地图对比分析。包括地图相关性分析、地图栅格值相减、地图叠加分析、地图规律目视对比等。

1.2.2 随机森林（Random Forest，缩写为RF）分析 将降水量、0℃以上积温、10℃以上积温、光照时数、蒸发量、土属名称、氮磷钾施用量、土壤有机质、土壤全氮、土壤有效磷、土壤速效钾、土壤pH带入RF模型，通过袋外数据（Out of Bag，简称OOB）获得预测变量对目标变量变异解释比的无偏估计（式(2)）^[15-16]。

$$\text{Var}_{\text{ex}} = \left(1 - \frac{\text{MSE}_{\text{OOB}}}{\hat{y}^2}\right) \times 100\% \quad (2)$$

式中， \hat{y}^2 为小麦产量样本的方差； MSE_{OOB} 为RF建模过程中利用OOB数据得到的模型误差方差的无偏估计； Var_{ex} 是在总方差中扣除误差方差所占的比例，代表了模型对小麦产量变异的解释程度。分别从全部解释变量集合中剔除土壤耕层性质、氮磷钾用量、土壤类型+气候，比较剩余变量对小麦产量变异的解释比变化。根据“重要变量被剔除后，变异解释比下降幅度较大”的原理判断各变量对小麦产量变异的相对影响力。

1.2.3 施肥量地理优化 参考有关文献确定的本区土壤氮磷钾丰缺指标，根据“以产定肥”和“因土施肥”原则，叠加小麦产量格局图与土壤养分分级图作为施肥量调整的空间单元。肥料用量参考已有相关研究，在界定的区域施肥量适宜范围内进行线性拉伸：高产低肥区推荐高用量，高产中肥区、中产低肥区推荐中等用量，高产高肥区、中产中肥区和低产低肥区推荐低用量，中产高肥区、低产高肥区和低产中肥区推荐最低用量。

2 结果与讨论

2.1 小麦“三区对照”施肥量及产量变异的基本特征

表1表明，与农民习惯施肥相比，推荐施肥方案的特点是：氮磷钾配施的样点数量增加并完全排除了氮肥单施的方案；在氮磷组合或者氮磷钾组合中推荐的施氮量降低、施钾量增加、施磷量几乎不

表 1 农民习惯施肥和地方专家推荐施肥氮磷钾用量的统计特征

Table 1 Comparison between CF and RF in N, P₂O₅ and K₂O application rate

方式	处理	数据量	肥料	最小值	最大值	平均值	标准差
Scheme	Treatment	Number	Fertilizer	Min / (kg·hm ⁻²)	Max / (kg·hm ⁻²)	Mean / (kg·hm ⁻²)	SD / (kg·hm ⁻²)
CF	N	62	N	97.5	501	208.5	72.4
			NP	67.5	475.5	210.7	53.6
	NPK	1 607	P ₂ O ₅	22.5	384	111.8	49.7
			N	60	435	196.8	46.4
			P ₂ O ₅	18	306	84	29
			K ₂ O	12	180	58.9	28.6
RF	NP	80	N	45	198	129.8	30.9
			P ₂ O ₅	30	210	109.7	36.5
	NPK	2 197	N	90	390	182.8	33.6
			P ₂ O ₅	15	228	85	23.9
			K ₂ O	30	225	73.2	28.9

注: CF 和 RF 分别表示习惯施肥和推荐施肥。下同。Note: CF and RF stands for customary fertilization scheme and recommended fertilization scheme, respectively. The same below.

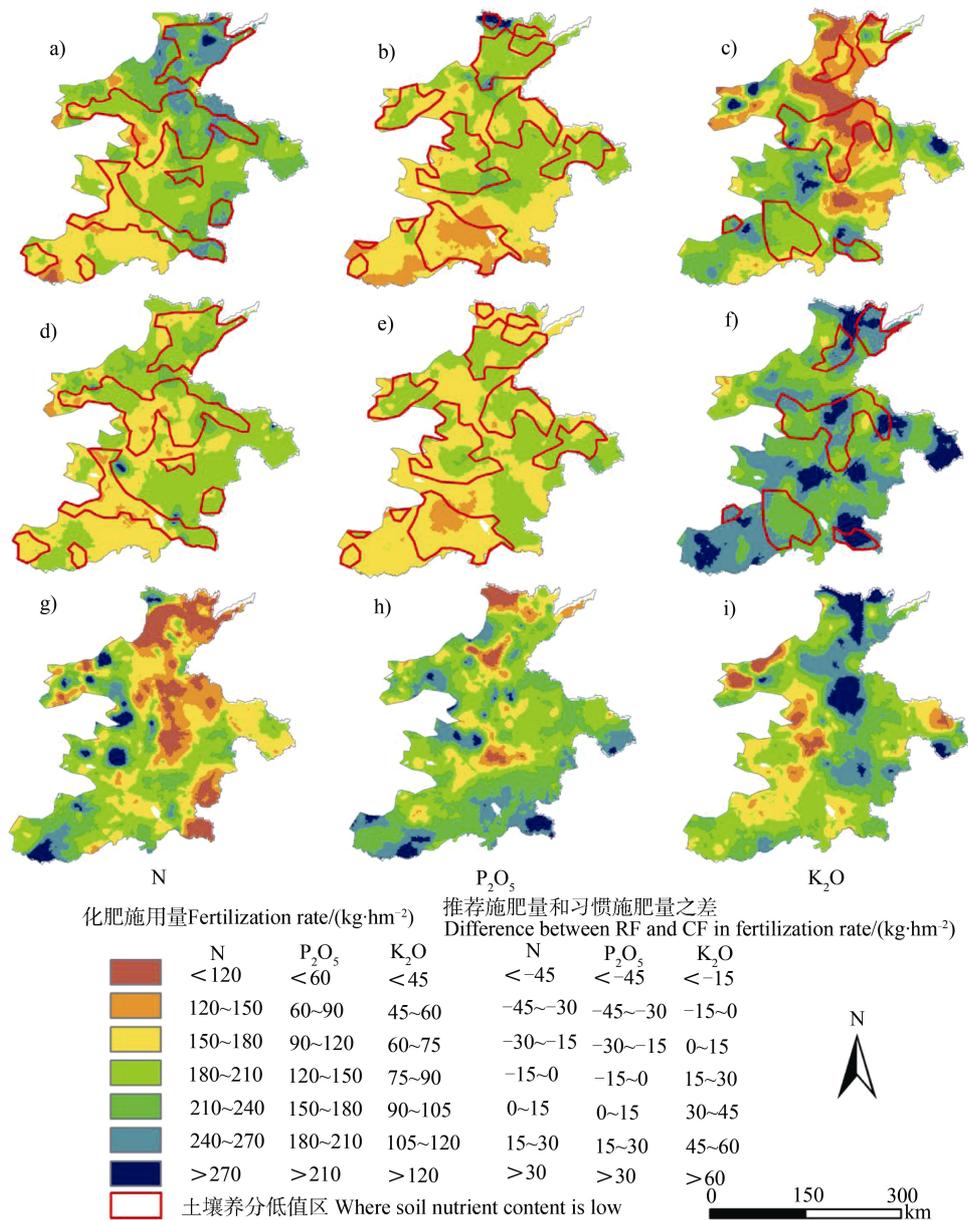
变。从图 2a)~图 2f) 可知, 习惯施肥模式下氮、磷、钾施用量主要区间分别是 150~270 kg·hm⁻²、90~150 kg·hm⁻²、0~105 kg·hm⁻², 推荐施肥下分别是 150~210 kg·hm⁻²、90~150 kg·hm⁻²、90~120 kg·hm⁻²。根据图 2 估算, 推荐的氮、磷、钾用量分别为习惯氮、磷、钾用量的 92%、98%和 136%。与农民习惯施肥相比, 地方专家推荐的氮、磷用量在北、中部普遍减少; 氮用量在西南部、磷用量在南部和西南部少数区域略有增加; 钾用量在大部分区域增加。

图 3a)~图 3c) 对比表明: (1) 不同方案下小麦产量图高度相似。经 ArcGIS 中波段集统计工具 Band Collection Statistic 计算, 不施肥与习惯施肥、推荐施肥小麦产量格局相关性分别为 0.76 和 0.71; 后两者的相关性为 0.93。(2) 不施肥条件下, 壤质潮土、黏质潮土是主要高产区; 低产区主要分布在砂质潮土、褐土、黄褐土和砂姜黑土。与不施肥相比, 习惯施肥的小麦增产幅度为 1 200~2 550 kg·hm⁻², 推荐施肥的小麦增产幅度为 1 650~3 000 kg·hm⁻²; 两种条件下小麦增产量的格局高度相似(图 3d)~图 3e), 主要表现为南部的砂姜黑土、黏质潮土区相对增产量较大。

2.2 施肥量、小麦产量与土壤养分的地图对比

氮、磷、钾用量变化图(图 2g)~图 2i) 与小麦产量变化图(图 3d)~图 3e) 对比表明: (1) 在习惯施氮大于 180 kg·hm⁻², 磷高于 120 kg·hm⁻² 的区域, 推荐方案中氮磷不同程度降低, 其中氮减量 0~15 kg·hm⁻²、15~30 kg·hm⁻²、30~45 kg·hm⁻² 的区域均有相当分布, 磷的减量区间主要在 0~15 kg·hm⁻²。(2) 推荐方案中氮磷减施的同时, 钾肥用量增长, 相应区域的小麦产量不同程度增加。可见增施钾肥是小麦单产增加的主要原因。但对比图 4 与图 2a)~图 2f) 发现: 习惯施肥和推荐施肥模式下氮、磷、钾用量与土壤养分丰缺均未很好匹配。习惯施肥模式下北部有较大面积缺钾土壤未得到有效的施钾补给; 推荐施肥模式下绝大部分区域施钾量增加, 但这种补偿是普遍性的, 与土壤钾丰缺无很好关联。

习惯施肥模式下氮、磷、钾的农学效率均值分别为 8.6、16.1、26.1 kg·kg⁻¹, 而推荐施肥条件下氮磷农学效率普遍提高, 钾农学效率则有所降低, 分别是 13.0、21.1、23.3 kg·kg⁻¹。两种施肥方式下的小麦增产量趋势均为南高北低, 而氮、磷用量趋势均为北高南低, 因此二者农学效率均呈南高北低的



注：图 a) ~c) 表示习惯施肥量，图 d) ~f) 表示专家推荐施肥量，图 g) ~i) 表示推荐施肥量与习惯施肥量的差。Note: Fig. a) ~c) stand for customary fertilization rate, fig. d) ~f) stand for recommended fertilization rate, fig. g) ~i) stand for difference between RF and CF in fertilization rate.

图 2 习惯施肥量和推荐施肥量
Fig. 2 Customary fertilization rate and recommended fertilization rate

变化格局 (图 5a) ~图 5d))。习惯施肥方式下中北部区域施钾量低，且存在较大面积低钾土壤，钾农学效率中间高、东西低 (图 5e))；推荐施肥条件下，大部分区域施钾量增加，钾农学效率也转化为南高北低的趋势 (图 5f))。该结果反映了氮磷钾供应充足时其农学效率主要与小麦区域产量潜力相关的事实，也说明施肥量未根据产量潜力进行合理调整。

2.3 小麦产量变异的主要影响力

根据随机森林分析 (表 2)，不施肥条件下，土壤耕层性质、施肥、土壤类型和气候对小麦产量变异的综合解释率为 31.2%，剔除土壤耕层参数后，变异解释率下降 3.2%；剔除土壤和气候参数后，变异解释率下降 15.7%，说明小麦基础地力的差异主要与气候和土壤类型等地理因素有关。在习惯施肥

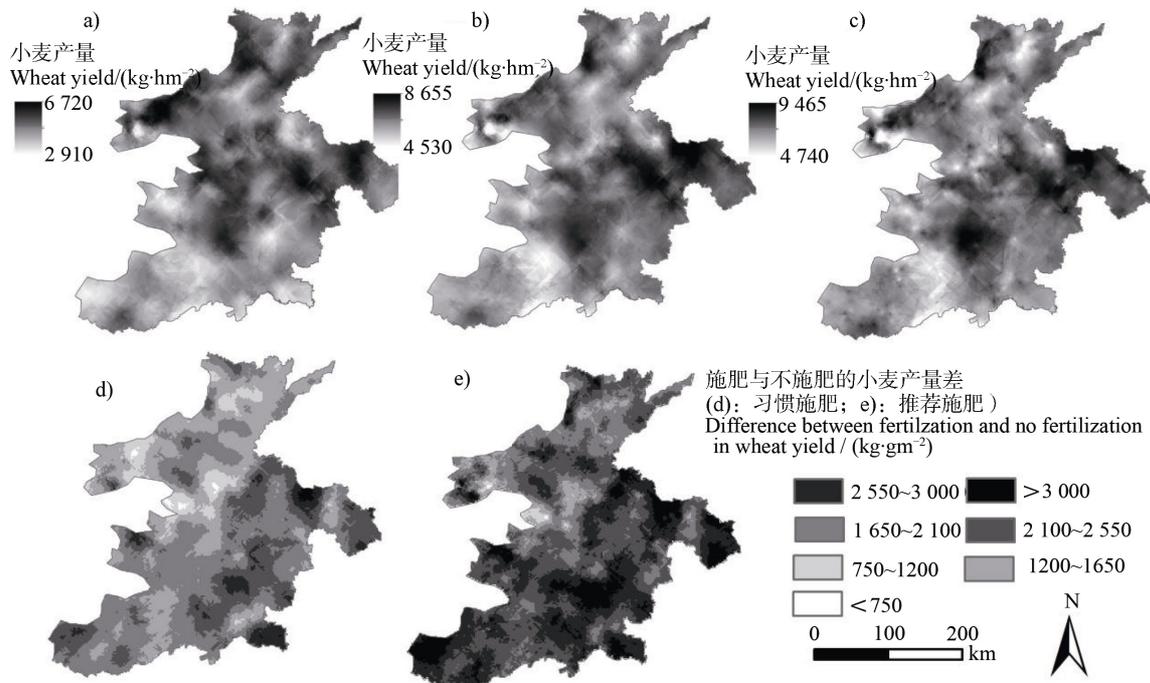


图 3 小麦单产变化和施肥增产效应

Fig. 3 Wheat yield and yield increasing effect relative to fertilization scheme (a), b) and c) stands for no fertilization, CF and RF, and d) and e) for CF and RF, respectively)

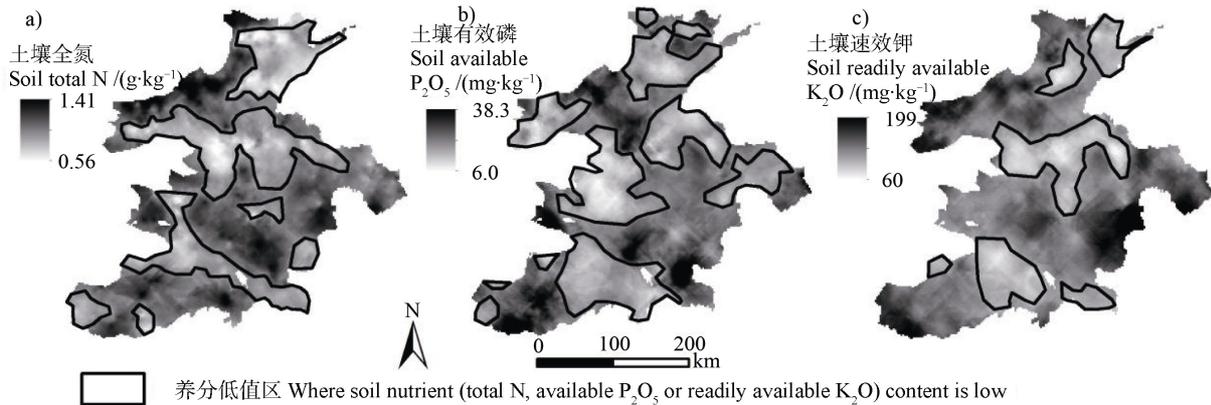


图 4 土壤氮磷钾含量

Fig. 4 Soil total N, soil available P₂O₅ and soil readily available K₂O content

条件下，土壤耕层性质、施肥、土壤类型和气候对小麦产量变异的综合解释率为 31.9%，分别剔除土壤耕层性质、施肥参数、土壤类型和气候后，变异解释率下降分别为 0.2%、3.4%和 9.8%；推荐施肥条件下，上述因子对小麦产量变异的综合解释率为 35.1%，分别剔除土壤耕层性质、施肥参数、土壤类型和气候，变异解释率分别下降 0、5.3%和 10.2%。

习惯施肥条件下各因子对小麦增产幅度的综合

解释率为 21.8%，剔除土壤耕层参数后，变异解释率下降 2.6%；剔除施肥因素后，变异解释率下降 7.3%；剔除土壤和气候参数后，变异解释率下降 5.9%。推荐施肥条件下各因子对小麦增产幅度的综合解释率亦为 21.8%，剔除土壤耕层参数后，变异解释率反而增长 1.5%，说明土壤耕层属性在推荐施肥条件下对于解释增产变异反而有所干扰；剔除施肥因素后，变异解释率下降 5.5%；剔除土壤和气

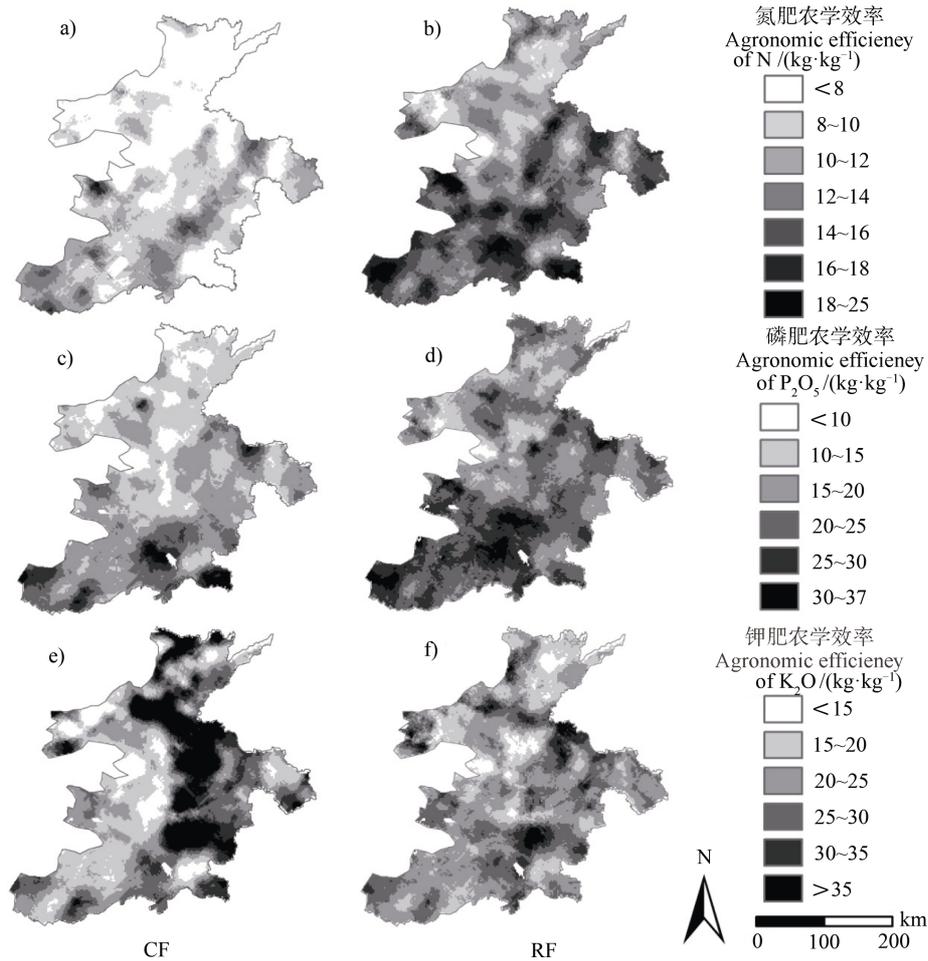


图 5 习惯施肥方式和推荐施肥方式下氮磷钾农学效率

Fig.5 Agronomic efficiency of N, P₂O₅ and K₂O relative to fertilization scheme (CF and RF)

表 2 不同自变量组合下随机森林模型对小麦产量变异的解释比

Table 2 Ratio of the Random Forest model explaining variation of wheat yield relative to composition of the model in variable/%

目标变量 Dependent variable	施肥方案 Fertilizer scheme	组合 1 Group1		组合 2 Group 2		组合 3 Group3		组合 4 Group4	
		均值	标准差	均值	标准差	均值	标准差	均值	标准差
		Mean	SD	Mean	SD	Mean	SD	Mean	SD
单位面积小麦产量 Per unit wheat yield/area (PUWY)	NF	31.2	0.09	28	0.07			15.5	0.05
	CF	31.9	0.02	31.7	0.06	28.5	0.21	22.1	0.02
	RF	35.1	0.05	35.1	0.15	29.8	0.16	24.9	0.18
单位面积施肥增产量 Increased PUWY caused by fertilization	CF	21.8	0.09	19.2	0.1	14.5	0.12	15.9	0.18
	RF	21.8	0.18	23.4	0.06	16.3	0.08	16.5	0.14

注：组合 1、2、3、4 分别表示全部自变量、剔除土壤耕层性质的剩余自变量、剔除施肥因素的剩余自变量、剔除土壤类型和气候因素的自变量。NF 表示不施肥。Note: Group1~4 respectively represents that all independent variables, all independent variables except for soil properties of the cultivated layer, all independent variables except fertilization, and all independent variables except soil type and climate variables, respectively and NF represents the scheme of no fertilization.

候参数后, 变异解释率下降 5.3%。综上, 习惯施肥条件下, 施肥因素对小麦增产量的影响略大于土壤和气候等地理因素, 而在推荐施肥条件下, 二者的影响基本相当; 土壤耕层性质对于解释小麦增产量变异的作用较小。

该结果定量说明河南小麦产量空间格局主要取决于气候和土壤等地理资源禀赋的差异, 施肥的影响次之。与不施肥处理相比, 施肥在提高产量的同时, 能降低土壤、气候等区域地理因子对总体变异的相对作用; 但增产量在小麦总产量构成中的比例较低, 而且不同施肥条件下小麦增产变异格局高度相似(图 3d)~图 3e); 因此, 施肥不能改变小麦产量变异由土壤和气候主导的宏观规律。耕层土壤性质对小麦产量变异的影响较小, 施肥, 尤其是推荐施肥, 进一步削弱了土壤耕层性质对作物总产量变异和增产量变异的影响力。这说明两种情况下的施肥量均较大, 很大程度削减了作物营养对土壤基础养分的依赖。尽管施钾是推荐施肥条件下小麦进一步增产的主要因素, 但推荐施肥条件下施肥因素对小麦产量变异的解释力反而有所下降, 应该与盲目增施钾肥有关。

综上所述, 研究区氮磷钾施用量调整应以小麦的产量空间变异特征为基础, “以产定肥”; 同时, 需要降低施用量, 以充分利用土壤有效养分供给, 即“因土施肥”。

2.4 氮磷钾施用量的地理优化与节肥潜力估算

参考河南部分土壤类型区丰缺试验结果^[21-25]进行土壤养分分级: 土壤全氮按照大于 1.1 g·kg⁻¹、0.9~1.1 g·kg⁻¹、0.7~0.9 g·kg⁻¹ (面积比例分别为 10.7%、56.5%、32.8%), 土壤有效磷按照 18~38 mg·kg⁻¹、12~18 mg·kg⁻¹、7~12 mg·kg⁻¹ (面积比例分别为 23.9%、59.3%、16.7%), 土壤速效钾含量按照大于 130 mg·kg⁻¹、90~130 mg·kg⁻¹、60~90 mg·kg⁻¹ (面积比例分别为 22.0%、66.0%、16.8%) 划分为高、中、低含量级别。在低、中、高肥力下, 孙克刚等^[21-22]统计的河南潮土和砂姜黑土小麦目标产量的中值分别为 6 500、7 000、7 500 kg·hm⁻², 仅在潮土区极高土壤肥力下划定目标产量区间 7 625~8 375 kg·hm⁻²。鉴于“三区对照”推荐施肥方案下小麦产量基本代表了氮磷钾全要素充分施肥下小麦产量水平, 可作为当前实现小麦潜力产量的代表; 对该产量图(图 3c))按自然裂点法分级,

获得低、中、高产量区间分别是 4 710~6 750 kg·hm⁻², 6 750~7 500 kg·hm⁻², 7 500~9 465 kg·hm⁻², 面积比例分别为 24.6%、49.4%、26.0%。

Liu 等^[4]和 Duan 等^[5]在郑州的试验表明, 土壤全氮 1.0 g·kg⁻¹ 条件下, 氮磷钾配施, 施氮量 165 kg·hm⁻² 与施氮量 247 kg·hm⁻² 的 15 年平均产量均为 6 400 kg·hm⁻²。在 6 个长期试验点的数据分析基础上, Zhang 等^[6]推荐华北地区小麦的施氮量为 202 kg·hm⁻², 能取得的平均产量为 6 527 kg·hm⁻², 是平均最高产量的 97.4%; Wang 等^[7]结合定位试验、文献分析和模型模拟, 指出施氮 185 kg·hm⁻² 是取得华北地区环境和产量最佳效应的临界施氮量, 可取得 7 000 kg·hm⁻² 左右产量。吴良泉^[11]统计, 华北灌溉冬麦区和雨养冬麦区推荐的平均施氮量分别为 184 和 180 kg·hm⁻², 目标产量分别为 7 500 和 6 800 kg·hm⁻²。Ying 等^[26]统计河南 17 个县 156 个点施氮 0、105、210、315、420 kg·hm⁻² 的小麦产量, 在 210 kg·hm⁻² 取得最高平均产量 7 020 kg·hm⁻², 并论证采用生态效应最优施氮量 175 kg·hm⁻², 不会造成明显减产。河南省小麦“三区对照”试验中地方专家推荐的施氮量主体范围在 150~210 kg·hm⁻² (图 2d)), 与不同文献统计的适宜施氮量变动范围较符合, 可以确定该施氮范围符合河南小麦生产实际需求。但基于不同试验点得到的适宜施氮量和产量存在差异, 说明有必要按土壤条件和产量差异进行施氮量地理优化。建议调整为: 在高产低氮区施氮 210 kg·hm⁻², 高产中氮和中产低氮区施氮 180 kg·hm⁻², 高产高氮区、中产中氮和低产低氮区 150 kg·hm⁻², 其他区域理论上氮效较低, 为 120 kg·hm⁻²。

孙克刚等^[21-22]推荐河南潮土、砂姜黑土有效磷在 7~12 mg·kg⁻¹、12~18 mg·kg⁻¹、18~38 mg·kg⁻¹ 条件下, 小麦施磷量分别为 105 kg·hm⁻²、90 kg·hm⁻²、60 kg·hm⁻² (潮土) 或者 75 kg·hm⁻² (砂姜黑土)。该施磷量范围的中值 82.5 kg·hm⁻² 与吴良泉^[11]推荐的华北灌溉冬麦区和雨养冬麦区平均施磷量 88 kg·hm⁻² 和 80 kg·hm⁻² 接近; 但显然根据小麦潜力产量分级和土壤有效磷丰缺拉伸施磷量更为合理。可依据孙克刚等^[21-22]的研究结果确定潮土和砂姜黑土施磷量; 同时, 鉴于褐土和黄褐土小麦产量水平相对较低, 分别借鉴相邻的潮土和砂姜黑土施磷标准不应造成减产。建议施磷量调整为: 高产低磷区

105 kg·hm⁻²，高产中磷区和中产低磷区 90 kg·hm⁻²，高产高磷、中产中磷和低产低磷区 60 kg·hm⁻²（潮土和褐土）或 75 kg·hm⁻²（砂姜黑土和黄褐土）；其他区域 45 kg·hm⁻²。

土壤速效钾在 60~90 mg·kg⁻¹、90~130 mg·kg⁻¹、及 130 mg·kg⁻¹ 以上三个范围，孙克刚等^[24]推荐砂姜黑土分别按照 120、90、45 kg·hm⁻² 的施钾量，田芳等^[25]推荐潮土按照 120 kg·hm⁻²、60 kg·hm⁻²、30 kg·hm⁻² 的施钾量。杜新慧等^[27]研究在郑州砂质潮土土壤速效钾含量 63 mg·kg⁻¹ 条件下，两个品种的小麦均在施钾 120 kg·hm⁻² 达到最高产量 6 570 和 7 000 kg·hm⁻²，超过该施用量产量反而降低。吴良泉^[1]推荐的华北灌溉冬麦区和雨养冬麦区平均施钾量分别为 51 和 59 kg·hm⁻²，与河南潮土区中等土壤供钾水平下的推荐施钾量 60 kg·hm⁻² 接近。综上对比，在 45 kg·hm⁻²~

120 kg·hm⁻² 施钾范围进行地理优化不应造成小麦减产：高产低钾区应施钾 120 kg·hm⁻²；高产中钾和中产低钾区施钾 90 kg·hm⁻²；高产高钾、中产中钾和低产低钾区 60 kg·hm⁻²；其他区域 45 kg·hm⁻²。

综上，按照施氮量 120~210 kg·hm⁻²、施磷量 45~105 kg·hm⁻²、施钾量 45~120 kg·hm⁻² 进行地理优化。优化的氮、磷、钾用量受产量变异引导向高产土壤集中（图 6）。预计可在不降低小麦产量基础上，较“三区对照”中的推荐方案分别降低氮、磷、钾用量 14.2%、40.0%和 39.5%（按地图统计），较习惯施肥方案分别降低氮、磷、钾用量 20.9%、41.1%和 17.5%。对照 Ying 等^[26]据河南部分试验估算的在不明显降低产量的同时，小麦采用优化施氮量较农民习惯施氮量降低 24%~37%，本文估算的节氮量在实践中可行。

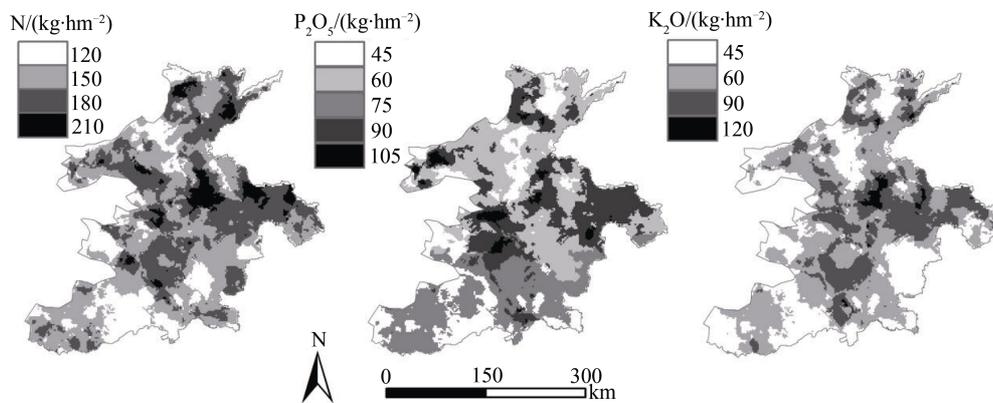


图 6 修正的推荐施肥量

Fig. 6 Modified recommendation of fertilizer application rate

2.5 近 10 年来小麦产量与施肥量的变化

图 7 表明，2017 年小麦产量变化主体范围 3 785~8 557 kg·hm⁻²，与图 3b) 反映的 2007—2009 年农民习惯施肥下的小麦产量主体范围 4 530~8 655 kg·hm⁻² 相比差异不明显；而且产量格局与 2007—2009 年基本一致：壤质潮土、黏质潮土、部分砂姜黑土是高产区，而砂质潮土、褐土、黄褐土分布区仍是相对的低产区。该格局与各县域具有障碍层（包括砂质土层、砂姜层、黏盘层、土层厚度小于 50 cm 等类型）的耕作土壤的面积比例具有极显著的负相关，*R* 值为 -0.40（图 8）。2013—2016 年该值分别为 -0.45、-0.44、-0.45、-0.41；按 *R*² 估算土壤差异对研究区小麦产量变异的解释力在 16%~20%，该结果确证近年来河南小麦产量空间变

异特征稳定，以及该特征与土壤地理分布具有密切关系。

此外，当前河南小麦产量空间变异具有高水、肥供应背景。按 2008—2017 年统计，豫北、豫东平原多数县市水浇地占耕地比重超过 90%；豫南部分地区水浇地比重偏低，但该区位于温带和亚热带过渡区，小麦生长季降水量充沛，因此，研究区小麦水分供应的空间差异性不大。同时，在高施肥背景下，研究区施肥量在 2008—2016 年仍持续增加，总折纯量从 468.9 万 t 上升至 537.1 万 t。

显然，水肥供应已不是限制河南小麦生产的短板，气候和土壤条件等自然禀赋对产量的制约凸显，并形成了较强的空间变异规律。考虑到自然禀赋改造的难度，短期内显著改变小麦产量空间变异规律

的可能性不大,在施肥优化时应充分利用这一特征。而近10年来河南小麦主产区施肥量仍整体走高,推广地理优化施肥方案具有迫切现实意义。

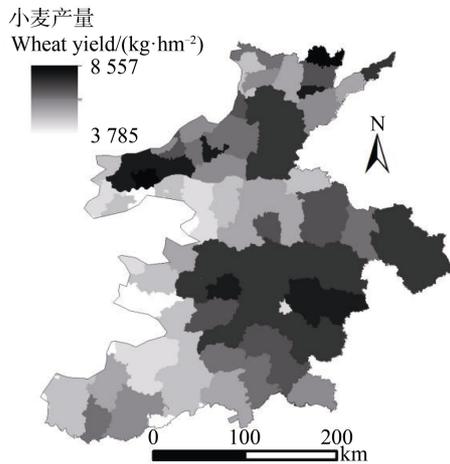


图7 2017年小麦产量

Fig. 7 Wheat yield of 2017

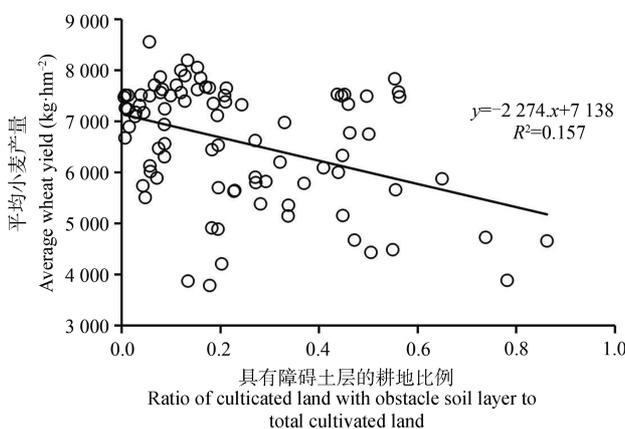


图8 县域具有障碍土层的耕地比例与小麦单产的关系

Fig. 8 Relationship between the ratio of cultivated land with obstacle soil layer and per unit wheat yield on the county scale

3 结论

在高水肥供给条件下,土壤、气候条件凸显为小麦产量变异的主控因素,施肥增产效应的空间格局也受其影响,不同施肥方式下小麦总产量和施肥后的增产量均显示较高的空间相似性。农民习惯施肥模式中氮、磷普遍施用量,而钾存在局部亏缺。地方专家推荐施肥方案中仅略降低了氮用量,磷用量未明显改变,而施钾普遍过量。它们的共同问题是施肥量偏大,且施肥量分配未与小麦产量格局、土壤养分丰缺相匹配。综合对比多源文献,河南小

麦主产区 N、 P_2O_5 、 K_2O 施用范围可确定为 $120\sim 210\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 、 $45\sim 105\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 和 $45\sim 120\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, 依据小麦产量空间变异特征和土壤养分丰缺对施肥方案进行地理优化,可使氮、磷、钾的施用量较推荐施肥模式分别节约 14.2%、40.0%和 39.5%,较农民习惯施肥模式分别节约 20.9%、41.1%和 17.5%。10年来河南小麦产量及其分布规律稳定,但总耗肥量明显增高,按地理优化方案施肥具有迫切的现实意义。

参考文献 (References)

- [1] Yu F, Shi W M. Nitrogen use efficiencies of major grain crops in China in recent 10 years[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2015, 52(6): 1311—1324. [于飞, 施卫明. 近10年中国大陆主要粮食作物氮肥利用率分析[J]. *土壤学报*, 2015, 52(6): 1311—1324.]
- [2] Zhang F S, Wang J Q, Zhang W F, et al. Nutrient use efficiencies of major cereal crops in China and measures for improvement[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2008, 45(5): 915—924. [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.]
- [3] Liu H, Wang Z H, Yu R, et al. Optimal nitrogen input for higher efficiency and lower environmental impacts of winter wheat production in China[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2016, 224: 1—11.
- [4] Liu J, Liu H, Huang S M, et al. Nitrogen efficiency in long-term wheat-maize cropping systems under diverse field sites in China[J]. *Field Crops Research*, 2010, 118(2): 145—151.
- [5] Duan Y H, Xu M G, Gao S D, et al. Nitrogen use efficiency in a wheat-corn cropping system from 15 years of manure and fertilizer applications[J]. *Field Crops Research*, 2014, 157(157): 47—56.
- [6] Zhang Y T, Wang H Y, Lei Q L, et al. Optimizing the nitrogen application rate for maize and wheat based on yield and environment on the Northern China Plain[J]. *The Science of the Total Environment*, 2018, 618: 1173—1183.
- [7] Wang H Y, Zhang Y T, Chen A Q, et al. An optimal regional nitrogen application threshold for wheat in the North China Plain considering yield and environmental effects[J]. *Field Crops Research*, 2017, 207: 52—61.
- [8] Chuan L M, He P, Pampolino M F, et al. Establishing a scientific basis for fertilizer recommendations for wheat in China: Yield response and agronomic efficiency[J]. *Field Crops Research*, 2013, 140: 1—8.
- [9] Sun H R, Zhang J P, Gang L H, et al. Abundance-deficiency indices of soil N and appropriate nitrogen application rates for rice in China[J]. *Chinese*

- Agricultural Science Bulletin, 2019, 35 (11): 82—87. [孙洪仁, 张吉萍, 江丽华, 等. 中国水稻土壤氮素丰缺指标与适宜施氮量[J]. 中国农学通报, 2019, 35(11): 82—87.]
- [10] Wu L Q, Wu L, Cui Z L, et al. Basic NPK fertilizer recommendation and fertilizer formula for maize production regions in China[J]. Acta Pedologica Sinica, 2015, 52 (4): 802—817. [吴良泉, 武良, 崔振岭, 等. 中国玉米区域氮磷钾肥推荐用量及肥料配方研究[J]. 土壤学报, 2015, 52 (4): 802—817.]
- [11] Wu L Q. Fertilizer recommendations for three major cereal crops based on regional fertilizer formula and site specific adjustment in China[D]. Beijing : China Agricultural University, 2014. [吴良泉. 基于“大配方、小调整”的中国三大粮食作物区域配肥技术研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2014.]
- [12] Xu X P, Wei D, Li Y Y, et al. Availability of fertilizer recommendation for spring maize based on yield response and agronomic efficiency in Northeast China[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2016, 22 (6): 1458—1467. [徐新朋, 魏丹, 李玉影, 等. 基于产量反应和农学效率的推荐施肥方法在东北春玉米上应用的可行性研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2016, 22 (6): 1458—1467.]
- [13] Xu X P, He P, Zhang J J, et al. Spatial variation of attainable yield and fertilizer requirements for maize at the regional scale in China[J]. Field Crops Research, 2017, 203 (203): 8—15.
- [14] Wu Z F, Zhao Y F, Cheng D Q, et al. Spatial analysis of the effect of soil-testing-based-formulated-fertilization of wheat based on geographically weighted regression[J]. Acta Pedologica Sinica, 2019, 56 (4): 860—872. [巫振富, 赵彦锋, 程道全, 等. 基于地理加权回归的小麦测土配方施肥效果空间分析[J]. 土壤学报, 2019, 56 (4): 860—872.]
- [15] Breiman L. Random forest [J]. Machine Learning, 2001, 45 (1): 5—32.
- [16] Liaw A, Wiener M. Classification and regression by randomForest. The Newsletter of the R Project, 2002, 2/3: 18—22.
- [17] Zhao Y F, Li H J, Chen J, et al. Comparison between soil mapping approaches based on their ability explaining soil variability—A case of mapping soil organic carbon density of soil (0~1 m) in Nanyang district[J]. Acta Pedologica Sinica, 2018, 55 (1): 43—53. [赵彦锋, 李豪杰, 陈杰, 等. 基于土壤变异解释力的几种土壤制图方法的对比研究——以南阳市 1m 土体土壤有机碳密度制图为例[J]. 土壤学报, 2018, 55 (1): 43—53.]
- [18] Krupnik T J, Ahmed Z U, Timsina J, et al. Untangling crop management and environmental influences on wheat yield variability in Bangladesh : An application of non-parametric approaches[J]. Agricultural Systems, 2015, 139: 166—179.
- [19] Agricultural Industry Standards of People's Republic of China. Technical standards for soil monitoring : NY/T1119-2006[S]. Beijing: China Agriculture Press, 2006. [中华人民共和国农业行业标准. 土壤监测规程: NY/T1119—2006[S]. 北京: 中国农业出版社, 2006.]
- [20] Henan Statistic Bureau. Henan statistical yearbook 2007—2018[OL]. 2019-02-14 [2019-04-25]. http://www.ha.stats.gov.cn/sitesources/hntj/page_pc/tjfw/tjcbw/list1.html. [河南省统计局. 河南统计年鉴 2007—2018[OL]. 2019-02-14 [2019-04-25]. http://www.ha.stats.gov.cn/sitesources/hntj/page_pc/tjfw/tjcbw/list1.html.]
- [21] Sun K G, He A L, Li X D, et al. Abundance and deficiency indices of soil available P for wheat and fertilization recommendation in fluvo-aquic soil district indices of soft available P based on ASI method[J]. Soil and Fertilizer Sciences in China, 2013 (2): 72—74. [孙克刚, 和爱玲, 李向东, 等. 潮土区麦田土壤有效磷施肥指标及小麦施磷推荐基于 ASI 法的土壤养分丰缺指标[J]. 中国土壤与肥料, 2013 (2): 72—74.]
- [22] Sun K G, Li B Q, He A L, et al. Abundance and deficiency indices of soil available P for wheat and fertilization recommendation in Shajiang black soil areas[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2010, 28 (2): 159—161, 182. [孙克刚, 李丙奇, 和爱玲, 等. 砂姜黑土区麦田土壤有效磷丰缺指标及推荐施磷量研究[J]. 干旱地区农业研究, 2010, 28(2): 159—161, 182.]
- [23] Wu J G. Abundance and deficiency indices of soil available P and available K for wheat of Henan Province. [J]. China Agricultural Technology Extension, 2014, 30 (1): 37—38. [武金果. 河南省小麦土壤有效磷钾丰缺指标研究[J]. 中国农技推广, 2014, 30 (1): 37—38.]
- [24] Sun K G, Li B Q, He A L. Abundance and deficiency indices of soil available K for wheat and fertilization recommendation in Shajiang black soil areas[J]. Acta Agriculturae Boreali-Sinica, 2010, 25 (2): 212—215. [孙克刚, 李丙奇, 和爱玲. 砂姜黑土区麦田土壤有效钾施肥指标及小麦施钾研究[J]. 华北农学报, 2010, 25 (2): 212—215.]
- [25] Tian F, Yue L X, Du F H. Tentative study of index of adequacy and inadequacy of phosphorous and potassium

- of wheat in Xinxiang City and recommended amounts of chemical fertilizer[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2013, 41 (18): 7806—7807, 7819. [田芳, 岳利霞, 杜昉航. 新乡市小麦磷钾养分丰缺指标与推荐施肥量研究[J]. *安徽农业科学*, 2013, 41 (18): 7806—7807, 7819.]
- [26] Ying H, Ye Y L, Cui Z L, et al. Managing nitrogen for sustainable wheat production[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2017, 162: 1308—1316.
- [27] Du X H, Wang Y, Wang Y L, et al. Potassium effects on different wheat varieties in sandy soil[J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2014, 34 (3): 358—363. [杜新慧, 王祎, 王宜伦, 等. 砂质潮土区不同小麦品种的施钾效应[J]. *麦类作物学报*, 2014, 34 (3): 358—363.]

(责任编辑: 陈荣府)