

基于 GIS 和丰缺指标法的区域施肥管理体系的构建

高宏艳^{1,3}, 索全义^{1*}, 郑海春², 郜翻身²

(1 内蒙古农业大学草原与资源环境学院, 内蒙古呼和浩特 010018; 2 内蒙古自治区土壤肥料和节水农业工作站, 内蒙古呼和浩特 010010; 3 内蒙古自治区农牧业科学院, 内蒙古呼和浩特 010037)

摘要:【目的】采用 GIS 定位和养分丰缺指标相结合的方法, 研究西辽河平原耕地土壤碱解氮、有效磷、速效钾的空间分布特点, 建立直观、精准的推荐施肥系统。【方法】西辽河平原包括科尔沁区、开鲁县、奈曼旗、科尔沁左翼后旗、科尔沁左翼中旗。以该区域的 15421 个土壤测试数据和 143 个玉米“3414 试验”数据为基础, 运用 GIS 方法计算耕地土壤碱解氮、有效磷、速效钾的空间插值结果, 结合土壤丰缺指标, 将西辽河平原耕地土壤碱解氮、有效磷、速效钾养分分区, 确定不同土壤氮磷钾养分组合下的施肥量, 并制作玉米氮磷钾分区施肥图。【结果】西辽河平原耕地土壤养分空间分布不均, 大部分土壤碱解氮含量较低, 有效磷、速效钾含量中等。耕地土壤有效氮、磷、钾养分含量呈低氮-中磷-中钾 (碱解氮 ≤ 69.5 mg/kg、有效磷 4.18~10.40 mg/kg、速效钾 90.3~152.5 mg/kg)、中氮-中磷-中钾 (碱解氮 69.5~107.9 mg/kg、有效磷 4.18~10.40 mg/kg、速效钾 90.3~152.5 mg/kg)、中氮-中磷-高钾 (碱解氮 69.5~107.9 mg/kg、有效磷 4.18~10.40 mg/kg、速效钾 > 152.5 mg/kg) 的面积占比分别为 42.4%、14.1%、13.5%。土壤碱解氮、有效磷、速效钾含量 (x) 与经济最佳施肥量 (y) 之间存在较好的对数关系, 氮施肥模型 $y = -102.5\ln(x) + 617.22$, 磷施肥模型 $y = -36.11\ln(x) + 174.1$, 钾施肥模型为 $y = -25.89\ln(x) + 180.96$ 。不同土壤养分组合种植玉米所需的经济最佳 N-P₂O₅-K₂O 用量 (kg/hm²) 组合分别为 202-110-58、168-107-57、164-102-47。【结论】土壤碱解氮、有效磷、速效钾含量与相对产量存在较好的对数函数关系。西辽河灌区土壤有效氮磷钾丰缺指标的划分以 75% 和 85% 作为相对产量的分级区间较为合适。在土壤有效氮磷钾养分大数据的支撑下, 采用 GIS 和丰缺指标法相结合的方法, 可以准确快捷地构建区域施肥管理体系。

关键词: GIS; 丰缺指标法; 土壤养分; 区域; 施肥体系

Construction of regional fertilization system based on GIS and nutrient abundance index

GAO Hong-yan^{1,3}, SUO Quan-yi^{1*}, ZHENG Hai-chun², GAO Fan-shen²

(1 College of Grassland, Resources and Environment, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot, Inner Mongolia 010018, China; 2 Inner Mongolia Soil Fertilizer and Water Saving Agriculture Workstation, Hohhot, Inner Mongolia 010010, China; 3 Inner Mongolia Academy of Agricultural and Animal Husbandry Science, Hohhot, Inner Mongolia 010037, China)

Abstract: 【Objectives】 We assessed available soil nutrients using a nutrient abundance index and graded the spatial distribution of the former based on GIS and soil nutrient grading in Xiliao River Plain. Further, we proposed fertilizer recommendations across the spatial layout. 【Methods】 Xiliao River Plain in Inner Mongolia covers Horqin District, Kailu County, Naiman Banner, Horqin Left Back Banner, and Horqin Left Middle Banner. Based on 15421 soil test data and 143 “3414” maize trail data, we calculate the spatial interpolation results of alkaline N, available P, and readily available K in the cultivated soil using GIS. Combining GIS with the method of soil abundance index, the nutrient management zones of soil alkaline N (AN), available P (AP), and readily available K (AK) were divided in Xiliao River Plain. The fertilizer uptake of different soil NPK nutrient

收稿日期: 2021-04-21 接受日期: 2021-06-12

基金项目: 农业农村部测土配方施肥项目。

联系方式: 高宏艳 E-mail: 905868022@qq.com; * 通信作者 索全义 E-mail: paul98@sina.com

combinations was determined. The map of N, P, and K zonal fertilization of maize was developed. 【 Results 】 The spatial distribution of soil nutrients in the cultivated soil was uneven. The content of soil AN was low, and the contents of soil AP and AK were medium in Xiliao River Plain. The most important combinations of soil AN-AP-AK were low (N)-medium (P)-medium (K), medium (N)-medium (P)-medium (K), and medium (N)-medium (P)-high (K). The area ratio of each combination was 42.4%, 14.1%, and 13.5%. There were better logarithmic relationships between the soil AN, AP, and AK content (x) and the economic optimal fertilizer rate (y). Nitrogen optimal fertilization model was $y = -102.5 \ln(x) + 617.22$, phosphorus optimal fertilization model was $y = -36.11 \ln(x) + 174.1$, and potassium optimal fertilization model was $y = -25.89 \ln(x) + 180.96$. Under the different soil nutrient combinations, the optimal dosage combinations of N, P_2O_5 , and K_2O for maize were 202-110-58 (kg/hm^2), 168-107-57 (kg/hm^2), and 164-102-47 (kg/hm^2). 【 Conclusions 】 The relative yield of maize has a good logarithmic relationship with soil AN, AP, and AK content. The simulation effects of the function between the relative yield of maize and soil nutrients differ under different methods. When dividing the abundance index of soil alkaline nitrogen, available phosphorus, and readily available potassium in the Xiliao River Plain, grading intervals of the relative yield of 75% and 85% are suitable. Under the big data support of soil nutrients, the regional fertilization management system can be established accurately and rapidly by combining the GIS and abundance index methods.

Key words: GIS; abundance index method; soil nutrient; region; fertilization system

构建区域施肥管理体系是根据不同地域土壤养分状况进行精确施肥管理的重要途径。根据土壤养分管理分区的情况, 科学合理地确定肥料的投入量, 不仅可以有效地提高肥料的利用率, 促进土壤生产潜力的发挥, 而且还能够提高作物产量和改善作物品质^[1-4]。近年来, 国内外学者针对不同研究区域进行了大量的分区施肥管理研究, 在土壤养分管理分区时, 采用的方法和分区标准各有不同, 未形成统一的方法。以中小尺度为研究对象时, 通常采用模糊 c-均值聚类法、K 均值聚类法等定量分析法^[5-6], 而针对大尺度的施肥区划多数是基于定性分析^[7-8], 综合考虑土壤、气候等环境因素, 并参考生态分区或种植业分区等区划类型, 而缺乏定量分析的理论支撑。研究表明, 土壤养分管理分区可以有效区分土壤养分的空间变异性, 可以将不同管理分区土壤养分的均值作为变量施肥的依据^[9-10]。土壤养分丰缺指标法是区域养分分级和分区的经典方法, 适合应用于有大量田间试验数据和土壤测试数据支撑的区域。根据不同作物、不同土壤养分条件确定最佳肥料用量的方法也多种多样, 大致可以分为基于土壤养分的推荐施肥方法和基于作物的推荐施肥方法两大类^[11]。最经典的肥料推荐方法主要是肥料效应函数法和目标产量法, 而肥料效应函数法又是平衡施肥中广泛应用的一种方法, 也是养分管理中确定推荐施肥量的常用方法^[12-13]。

内蒙古西辽河平原土壤肥沃, 耕地面积广, 种植的主要粮食作物是玉米, 素有“北方粮仓”之称^[14], 对该区域土壤养分进行分区管理是玉米科学施肥的基础, 也是摸清区域土壤养分特征的重要手段, 对于农业的可持续发展有重要的意义^[15]。但是, 由于西辽河平原耕地面积大且地块分散, 不能实现每个地块土壤养分的测试。土壤养分在空间分布上表现出一定的空间异质性, 而传统的区域推荐施肥方法不能满足空间数据分析的需要, 存在一定的局限性, 且缺少空间上的直观展示效果。基于这个原因, 将 GIS 方法与土壤养分丰缺指标法、肥料效应函数法等经典方法结合起来, 划分土壤养分的分级和制定准确的施肥方案。本研究借助地统计学和 GIS 手段, 将分散的土壤点状养分测试结果, 赋值到面域, 依托土壤养分的大数据基础, 对土壤养分进行分区管理, 并以大量的玉米“3414”肥料试验为基础, 采用土壤养分丰缺指标法结合 GIS 方法, 构建了不同土壤养分分区的玉米施肥体系, 旨在探索科学的区域施肥推荐方法和先进的养分管理技术, 为农业生产和科学施肥提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 数据源

研究中数据为内蒙古西辽河平原 2009 年 15421 个土壤样品的碱解氮、有效磷、速效钾测试数据和

143 个玉米“3414”试验数据, 分布于开鲁县 (Kailu Country, KL)、科尔沁区 (Horqin District, HQ)、科尔沁左翼后旗 (简称科左后旗, Horqin Left Back Banner, HLB)、科尔沁左翼中旗 (简称科左中旗, Horqin Left Middle Banner, HLM)、奈曼旗 (Naiman Banner, NM)。以上数据均来自农业部测土配方施肥项目 (土壤采样点分布见图 1), “3414”试验点分布见图 2。

1.2 数据统计与分析

1.2.1 经济最佳施肥量和最高产量施肥量的计算方法

用 Excel 软件作回归分析, 分别模拟 143 个玉米“3414”试验的氮、磷、钾肥料用量 (纯量) 和相应处理玉米产量的一元二次效应函数。将符合肥料报酬递减律和一元二次函数曲线特点的方程, 进行边际效应分析, 采用微分求导法^[16]计算经济最佳施肥量和最高产量施肥量。

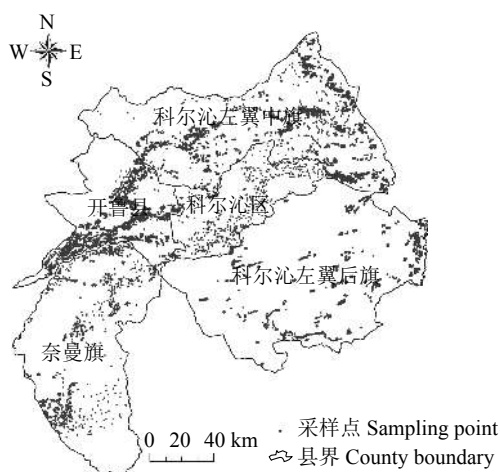


图 1 土壤采样点分布图

Fig. 1 Distribution map of soil sampling points

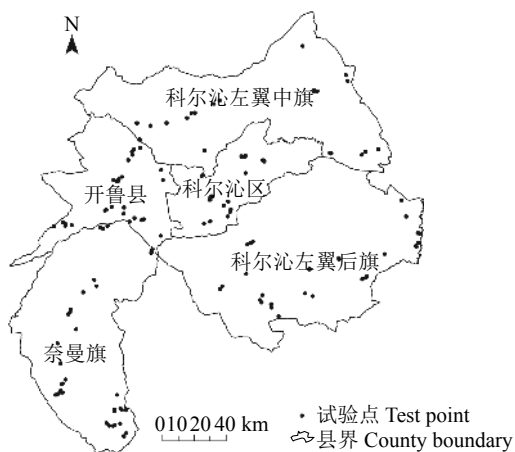


图 2 试验点分布图

Fig. 2 Distribution map of test points

1.2.2 相对产量计算方法 相对产量是指在不施某种肥料时, 作物单位面积的籽粒产量与施用所有肥料时单位面积产量的比值, 常用百分数来表示。研究中采用 3 种不同的方法计算相对产量, 通过对比得出最优相对产量。相对产量 1 (RY₁) 是肥料效应函数中无肥区产量与最经济产量的比值; 相对产量 2 (RY₂) 是肥料效应函数中无肥区产量与最高产量的比值; 相对产量 3 (RY₃) 是无肥区产量与 N₂P₂K₂ 处理区产量的比值。

1.2.3 土壤养分空间插值方法 采用普通克里格插值法 (Ordinary Kriging)^[17]对土壤碱解氮、有效磷、速效钾含量进行空间插值, 该方法是以变异函数理论和结构分析为基础, 通过对已知样本点赋权重来求得未知样本点 (区域) 的值, 其计算公式为: $Z(\chi_0) = \sum_{i=1}^n \lambda_i Z(\chi_i)$, 式中, $Z(\chi_0)$ 是未知样点 χ_0 处的估计值, $Z(\chi_i)$ 是已知采样点 χ_i 处的实测值, λ_i 为第 i 个已知采样点对未知样点的影响权重系数, n 为搜索半径内已知采样点的个数。

1.3 软件平台

应用 SPSS 软件和 Excel 软件进行数据的统计分析和散点图的制作。应用 ArcMap 10.5 软件进行 GIS 图件制作。

2 结果与分析

2.1 确定经济最佳施肥量和最高产量施肥量

通过玉米“3414”试验点数据, 计算经济最佳施肥量和最高产量施肥量, 用于对比不同方法计算相对产量的差异以及为推荐区域施肥量提供点状数据。按照等距离法将经济最佳施肥量和最高产量施肥量分别划分为 5 个等级区间, 统计不同等级区间分布的试验数量占比 (表 1)。

由表 1 可知, 西辽河平原玉米的经济最佳施 N、P₂O₅、K₂O 量和最高产量施 N、P₂O₅、K₂O 量均存在较大变幅, 在不同的施肥量等级区间均有分布且分布不均, 因此, 需要对西辽河平原地区进行分区施肥管理。

2.2 建立土壤有效养分的丰缺指标

2.2.1 划分相对产量等级 以往内蒙古划分土壤养分丰缺指标, 将相对产量取值 65% 定为低级, 相对产量取值 90% 定为高级^[18]。经过计算统计, 发现相对产量小于 70% 和大于 90% 时, 所对应的土壤养分含量在实际中分布很少, 没有实际划分意义。因

表 1 不同产量目标施肥量等级的试验数量占比

Table 1 Proportion of test number at different levels of fertilizer

产量目标 Yield target	养分 Nutrient	总试验数量 Total test number	平均施肥量 Mean rate (kg/hm ²)	各级施肥量试验数量占比 (%) The proportion of test number under each nutrient rate				
				≤ 50	50~100	100~150	150~200	≥ 200
最佳经济产量 Optimal economical yield	N	137	178.0	0	2.2	32.8	31.4	33.6
	P ₂ O	130	98.9	8.5	43.0	38.5	7.7	2.3
	K ₂ O	124	64.0	22.6	70.2	6.4	0.8	0
最高产量 Maximun yield	N	137	209.3	0	0	19.7	30.7	49.6
	P ₂ O	130	127.7	0.8	30.0	49.2	11.5	8.5
	K ₂ O	124	74.4	8.9	79.0	9.7	2.4	0

此, 我们将西辽河平原土壤有效养分的丰缺指标调整为相对产量 85% 和 75%。

2.2.2 土壤碱解氮、有效磷、速效钾丰缺指标 分别模拟 3 种不同方法确定的相对产量与各试验点的土壤碱解氮、有效磷、速效钾含量的对数函数关系。

选择 F 值和 R^2 较大的函数关系式用于计算各养分的丰缺指标。将 75%、85% 分别代入相对产量和土壤养分的函数关系式中, 即得到了土壤碱解氮、有效磷、速效钾的丰缺指标 (表 2)。由表 2 可知, 碱解氮 ≤ 69.5 mg/kg 为低级, 69.5~107.9 mg/kg 为中级, >107.9 mg/kg 为高级。有效磷 ≤ 4.18 mg/kg 为低级, 4.18~10.40 mg/kg 为中级, >10.40 mg/kg 为高级。速效钾 ≤ 90.3 mg/kg 为低级, 90.3~152.5

mg/kg 为中级, >152.5 mg/kg 为高级。

2.3 建立经济最佳施肥量与土壤有效养分含量的施肥模型

各试验点经济最佳肥料用量与土壤碱解氮、有效磷、速效钾含量存在对数函数关系 (图 3)。

将土壤碱解氮、有效磷、速效钾的丰缺指标所对应的土测值分别代入到图 3 N、P₂O₅、K₂O 最佳施肥量的施肥模型中, 可以得到相应的 N、P₂O₅、K₂O 的经济最佳肥料用量, 根据内蒙古西辽河平原土壤养分的极大值和极小值确定经济合理施肥的区间取值范围 (表 3)。

2.4 构建区域施肥管理体系

将西辽河平原 15421 个土壤样品的碱解氮、有

表 2 不同相对产量划分的土壤养分丰缺指标

Table 2 Soil nutrient abundance index of different relative yields

土壤养分 Soil nutrient	相对产量类型 Relative yield type	丰缺指标 Abundance index (mg/kg)			相对产量与土壤 养分关系式 Relative yield and soil nutrient function	R^2	F	P
		低 Low (≤ 75%)	中 Medium (75%~85%)	高 High (>85%)				
碱解氮 Alkeline-N	RY ₁	≤ 68.2	68.2~107.2	>107.2	$y = 22.123\ln(x) - 18.418$	0.490	95.057	<0.001
	RY ₂	≤ 69.2	69.2~109.3	>109.3	$y = 21.902\ln(x) - 17.801$	0.492	95.631	<0.001
	RY ₃	≤ 69.5	69.5~107.9	>107.9	$y = 22.716\ln(x) - 21.332$	0.553	122.237	<0.001
有效磷 Available P	RY ₁	≤ 4.09	4.09~10.14	>10.14	$y = 11.022\ln(x) + 59.467$	0.610	140.775	<0.001
	RY ₂	≤ 4.18	4.18~10.40	>10.40	$y = 10.985\ln(x) + 59.277$	0.630	151.759	<0.001
	RY ₃	≤ 3.80	3.80~10.32	>10.32	$y = 10.019\ln(x) + 61.614$	0.611	141.495	<0.001
速效钾 Available K	RY ₁	≤ 90.3	90.3~152.5	>152.5	$y = 19.062\ln(x) - 10.829$	0.606	143.137	<0.001
	RY ₂	≤ 90.9	90.9~153.9	>153.9	$y = 18.964\ln(x) - 10.513$	0.604	141.805	<0.001
	RY ₃	≤ 78.3	78.3~141.7	>141.7	$y = 16.858\ln(x) + 1.4857$	0.542	111.111	<0.001

注 (Note): RY₁ = 无肥区产量/最经济产量; RY₂ = 无肥区产量/最高产量; RY₃ = 无肥区产量/N₂P₂K₂ 处理产量。函数关系方程中, y 代表相对产量, x 代表土壤养分含量。RY₁ = no-fertilizer yield/optimum yield; RY₂ = no-fertilizer yield/maximum yield; RY₃ = no-fertilizer yield/N₂P₂K₂ yield. In the function, y and x represent relative yield and nutrient content, respectively.

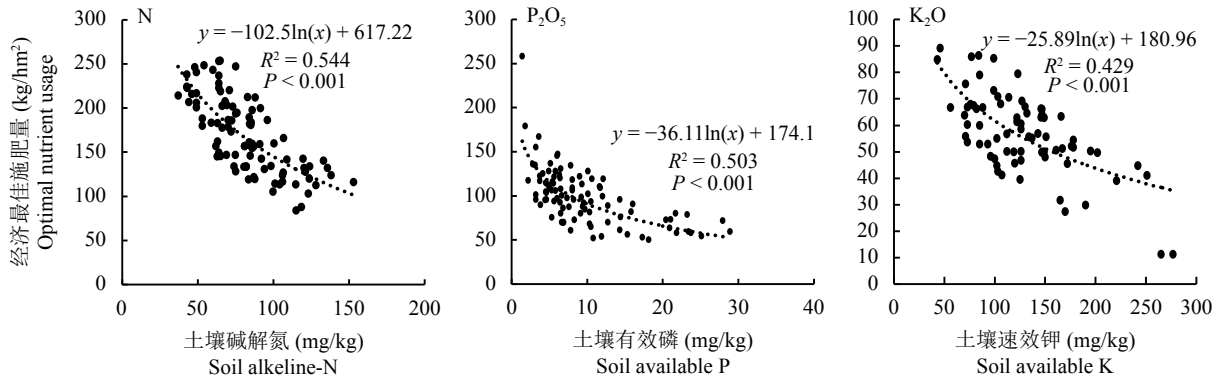


图3 玉米最佳氮磷钾肥经济施用量与土壤养分含量的函数关系图

Fig. 3 The function relationship between optimal nutrient rate and soil available nutrient content

表3 不同丰缺指标下玉米最佳 N、P₂O₅、K₂O 肥料用量

Table 3 Maize optimal fertilizer use under different ranges of soil nutrient content

土壤养分 Soil nutrient	丰缺程度 Grade	相对产量 Relative yield	养分含量 (mg/kg) Nutrient content	经济施肥范围 (kg/hm ²) Optimal fertilizer rate
碱解氮 Alkeline-N	低 Low	≤ 75%	≤ 69.5	182.5~235.6
	中 Medium	75%~85%	69.5~107.9	137.4~182.5
	高 High	>85%	>107.9	44.4~137.4
有效磷 Available P	低 Low	≤ 75%	≤ 4.18	122.4~151.1
	中 Medium	75%~85%	4.18~10.40	89.5~122.4
	高 High	>85%	>10.40	67.6~89.5
速效钾 Available K	低 Low	≤ 75%	≤ 90.3	64.4~77.2
	中 Medium	75%~85%	90.3~152.5	50.8~64.4
	高 High	>85%	>152.5	39.6~50.8

效磷、速效钾测试值进行空间插值。按照土壤碱解氮、有效磷、速效钾的丰缺指标，对西辽河平原耕地土壤的碱解氮、有效磷、速效钾含量水平进行高、中、低等级的赋值。将耕地图与行政区划图叠加，形成耕地土壤碱解氮、有效磷、速效钾含量水平分布图，并在 Arcgis10.5 软件中进行叠加处理，形成碱解氮、有效磷、速效钾的丰缺水平组合图。根据西辽河平原土壤氮磷钾养分丰缺水平组合分布图，将每个管理单元的土壤碱解氮、有效磷、速效钾含量代入土壤测试值与最佳施肥量的函数关系式，得到每个管理单元玉米的最佳 N、P₂O₅、K₂O 肥料用量。统计分析内蒙古西辽河平原每种土壤氮磷钾养分丰缺水平组合的平均 N、P₂O₅、K₂O 肥料用量，将平均值作为该组合的 N、P₂O₅、K₂O 肥料用量，并用不同的颜色显示，生成了西辽河平原不同土壤养分分区玉米的 N、P₂O₅、K₂O 最佳肥料用量图(图4)。

从图4可以看出，西辽河平原耕地土壤养分状况以低氮-中磷-中钾的面积占比最高，为42.4%，即土壤碱解氮含量 ≤ 69.5 mg/kg、有效磷 4.18~10.4 mg/kg、速效钾 90.3~152.5 mg/kg；其次是中氮-中磷-中钾组合、中氮-中磷-高钾组合、低氮-低磷-低钾组合，耕地面积占比分别为14.1%、13.5%、10.2%，以上4种组合的面积占比之和为80.2%，其他14种组合的面积占比只有19.8%，说明内蒙古西辽河平原耕地的整体养分状况以这4种组合方式为主，且耕地土壤碱解氮、有效磷、速效钾养分含量空间分布不均匀，需要根据耕地土壤的不同养分状况进行合理的推荐施肥。由图4可知，该4种土壤养分组合模式下，种植玉米所需的最佳 N、P₂O₅、K₂O 用量 (kg/hm²) 组合分别为 202-110-58、168-107-57、164-102-47、218-130-68。

3 讨论

采用科学的方法对土壤养分进行分区是养分管

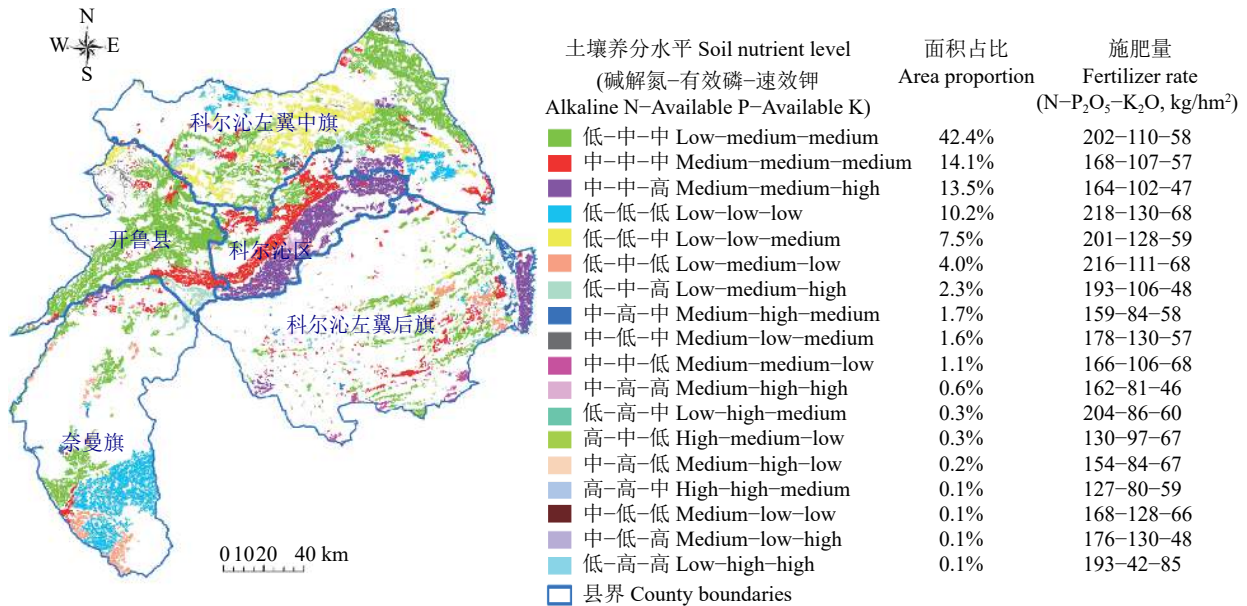


图 4 西辽河平原土壤养分分区及氮磷钾肥料最佳用量

Fig. 4 Soil nutrient zoning and the optimal fertilizer rate in Xiliao River Plain

理最重要的一个环节。向德明等^[19]采用 GPS 和模糊 C-均值聚类相结合的方法, 将湘西植烟区划分为 3 个土壤养管理区。张云贵等^[20]将土壤无机氮、有效磷、速效钾作为数据源, 运用聚类分析的方法对研究地块进行了养管理分区。近年来, 我国学者也有针对灌区农作物使用丰缺指标法进行推荐施肥的研究^[21-23]。付莹莹等^[24]、刘芬等^[25]采用丰缺指标法和肥料效应函数法建立了关中灌区夏玉米、冬小麦的丰缺指标体系, 并确定了不同肥力水平下的平均推荐施肥量。土壤养分丰缺指标法是国际上最通用的测土配方施肥方法^[26-27], 也是中国进行测土配方施肥工作所形成的较为成熟的方法之一。本研究中将传统方法与 GIS 方法相结合, 从空间上全方位的将耕地土壤碱解氮、有效磷、速效钾的养分进行了区域划分, 并根据养分的空间分布状况确定了氮、磷、钾肥料的用量, 具有较好的空间展示效果, 实现了土壤养分和推荐施肥的区域化管理。

在土壤养分丰缺指标的相关研究中, 学者们确定丰缺指标分级时采用的分级标准并不统一。在测土配方施肥技术要览中, 相对产量小于 50% 时所对应的养分含量为极低, 50%~75% 为低, 75%~90% 为中等, 90%~95% 为高, 大于 95% 为极高, 推荐使用该分级标准进行分级^[28]。由于研究区域土壤养分含量水平不同, 在划分丰缺指标时会出现缺少极低或极高等级的情况, 学者对分级标准(临界值)做了不同程度的调整。陈新平等^[29]以相对产量 50%、

75% 和 95% 作为划分土壤养分的丰缺标准, 将我国农田的大量元素养分划分为极低、低、中、高 4 个等级。黄亿等^[30]在构建川中丘陵区油菜施肥指标体系时, 以相对产量 75%、80%、85%、90% 为标准, 将土壤有效磷的丰缺程度划分为低、较低、中、较高、高 5 个等级。戢林等^[31]以水稻相对产量 75%、80%、85%、90% 和 95% 为标准, 将川中丘陵区土壤有效养分划分为低、较低、中、较高和高 5 个等级。本研究依据第二次土壤普查的标准初步判断西辽河平原灌区耕地土壤养分的水平属于中氮中磷中钾, 缺少较低和较高含量水平的类型。经统计, 在西辽河平原的 143 个试验点中, 与相对产量小于 70% 和大于 90% 相对应的土壤养分在实际中的分布很少, 因此, 把相对产量的分级标准定为 75%、85%, 将土壤养分丰缺指标划分为低、中、高三级。由于不能充分覆盖土壤养分肥力的分布区间范围, 这可能是由于西辽河平原常年大量施用化学肥料, 致使耕地土壤养分肥力水平有所提高, 玉米的相对产量也有所提高。但是化学肥料的长期施用破坏了土壤结构, 使得土壤养分没有出现极高的含量, 因此, 大于 90% 的作物相对产量也极少。这个分级标准与其他学者的标准不同, 经过验证表明该分级标准适合西辽河平原的土壤养分分级。

学者们通过相对产量分级建立了不同作物的土壤养分丰缺指标, 但是在计算相对产量时采用的方法也不同。大部分学者用无肥区产量与全肥区产量

的比值来计算相对产量^[30, 32]。也有学者用“3414”试验中无肥区产量与4个处理中最高产量的比值来计算相对产量^[33]。本研究在划分土壤养分丰缺指标时,采用3种不同的方法计算了相对产量,不同方法得到的相对产量与土壤养分的函数模型的模拟效果不同,氮肥、磷肥、钾肥的相对产量分别以 RY_3 、 RY_2 、 RY_1 的拟合效果最优。由于研究对象的不同,试验设计的不同,没有形成统一的相对产量的计算方法。因此,需要根据不同研究对象的特点来确定适宜的计算方法。丰缺指标的高中低分级标准也不统一,应该根据研究区域土壤养分的高低和具体的分布特征,来确定合理的分级标准。

4 结论

在西辽河平原,以75%和85%的相对产量作为划分土壤有效氮磷钾高中低丰缺指标的临界值更为合理。按照此标准,土壤碱解氮、有效磷、速效钾最主要的组合方式为低氮-中磷-中钾、中氮-中磷-中钾、中氮-中磷-高钾组合,面积占比分别为42.4%、14.1%、13.5%,对应的玉米所需的最佳N、 P_2O_5 、 K_2O 用量(kg/hm^2)组合分别为202-110-58、168-107-57、164-102-47。

参考文献:

- [1] 唐春闰,李强,李帆,等.基于GIS和FCM的宁乡植烟土壤养分管理分区[J].湖北农业科学,2017,56(6):1029-1032,1039.
Tang C G, Li Q, Li F, et al. Definition of management zones of tobacco soil nutrients based on GIS and FCM in Ningxiang[J]. Hubei Agricultural Sciences, 2017, 56(6): 1029-1032, 1039.
- [2] 王宜伦,苏瑞光,刘举,等.养分专家系统推荐施肥对潮土夏玉米产量及肥料效率的影响[J].作物学报,2014,40(3):563-569.
Wang Y L, Su R G, Liu J, et al. Effects of nutrient expert recommend fertilization on yield and fertilizer efficiency of summer maize in fluvo-aquic soil[J]. Acta Agronomica Sinica, 2014, 40(3): 563-569.
- [3] Bongiovanni R G, Robledo C W, Lambent D M. Economics of site-specific nitrogen management for protein content in wheat[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2007, 58: 13-24.
- [4] Fridgen J J, Kitchen N R, Sudduth K A, et al. Management zone analyst (MZA): Software for subfield management zone delineation [J]. Agronomy Journal, 2004, 96(1): 100-108.
- [5] 武德传,罗红香,宋泽民,等.黔南山地植烟土壤主要养分空间变异和管理分区[J].应用生态学报,2014,25(6):1701-1707.
Wu D C, Luo H X, Song Z M, et al. Spatial variability and management zone of soil major nutrients in tobacco fields in Qiannan mountainous region[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2014, 25(6): 1701-1707.
- [6] 郭澎涛,李茂芬,林钊沐,等.基于多源环境变量的橡胶园土壤管理分区[J].农业工程学报,2014,30(12):96-104.
Guo P T, Li M F, Lin Z M, et al. Delineating soil management zones in rubber plantation using multisource data of environmental variables[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2014, 30(12): 96-104.
- [7] 车升国.区域作物专用复合(混)肥料配方制定方法与应用[D].北京:中国农业大学博士学位论文,2015.
Che S G. Design method and application of formula of regional crop-based compound fertilizer[D]. Beijing: PhD Dissertaion of China Agricultural University, 2015.
- [8] 张树清.甘肃农田氮磷钾养分资源特征研究[D].兰州:甘肃农业大学博士学位论文,2001.
Zhang S Q. Characteristics of nitrogen, phosphorus and potassium nutrient resources in farmlands of Gansu[D]. Lanzhou: PhD Dissertaion of Gansu Agricultural University, 2001.
- [9] Mzuku M, Khosla R, Reich R, et al. Spatial variability of measured soil properties across site-specific management zones[J]. Soil Science Society of America Journal, 2005, 69(5): 1572-1579.
- [10] 王子龙,付强,姜秋香,等.基于粒子群优化算法的土壤养分管理分区[J].农业工程学报,2008,24(10):80-84.
Wang Z L, Fu Q, Jiang Q X, et al. Soil nutrient management zones based on particle swarm optimization algorithm[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2008, 24(10): 80-84.
- [11] 串丽敏,何萍,赵同科.作物推荐施肥方法研究进展[J].中国农业科技导报,2016,18(1):95-102.
Chuan L M, He P, Zhao T K. Research advance on recommendation for crop fertilization methodology[J]. Journal of Agricultural Science and Technology, 2016, 18(1): 95-102.
- [12] 杨俐苹,白由路,王贺,等.测土配方施肥指标体系建立中“3414”试验方案应用探讨——以内蒙古海拉尔地区油菜“3414”试验为例[J].植物营养与肥料学报,2011,17(4):1018-1023.
Yang L P, Bai Y L, Wang H, et al. Application of “3414” field trial design for establishing soil testing and fertilizer recommendation index[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2011, 17(4): 1018-1023.
- [13] 章明清,李娟,孔庆波,等.作物肥料效应函数模型研究进展与展望[J].土壤学报,2016,53(6):1343-1356.
Zhang M Q, Li J, Kong Q B, et al. Progress and prospect of the study on crop-response-to-fertilization function model[J]. Acta Pedologica Sinica, 2016, 53(6): 1343-1356.
- [14] 周伟,周亚星,马日亮,等.西辽河平原灌区玉米种植密度调查分析[J].天津农林科技,2015,(S1):29-32.
Zhou W, Zhou Y X, Ma R L, et al. Investigation and analysis of maize planting density in Xiliaohe plain irrigation area[J]. Science and Technology of Tianjin Agriculture and Forest, 2015, (S1): 29-32.
- [15] 童倩倩,李莉婕,赵泽英,等.基于GIS的贵州稻田土壤养分管理分区[J].西南农业学报,2017,30(12):2727-2731.
Tong Q Q, Li L J, Zhao Z Y, et al. Management subarea of paddy soil nutrients based on GIS in Guizhou[J]. Southwest China Journal of Agricultural Sciences, 2017, 30(12): 2727-2731.
- [16] 张南冰,潘艳花.河西内陆灌区盐渍土甜菜氮磷钾肥最大利润施用量研究[J].中国糖料,2017,39(4):14-17.
Zhang N B, Pan Y H. NPK fertilizer application amount for

- maximum profit rate of sugarbeet in irrigation area of Hexi inland saline soil[J]. *Sugar Crops of China*, 2017, 39(4): 14–17.
- [17] Yao X, Yu K Y, Deng Y B, *et al.* Spatial variability of soil organic carbon and total nitrogen in the hilly red soil region of Southern China[J]. *Journal of Forestry Research*, 2020, 31(6): 2385–2394.
- [18] 潘峰, 陶杰, 冯建军, 等. 内蒙古扎鲁特旗春玉米推荐施肥指标体系研究[J]. *内蒙古民族大学学报(自然科学版)*, 2011, 26(4): 424–428. Pan F, Tao J, Feng J J, *et al.* Study on index system of optimal fertilizer treatment on spring corn in Zhalute Banner[J]. *Journal of Inner Mongolia University for Nationalities*, 2011, 26(4): 424–428.
- [19] 向德明, 李强, 黎娟, 等. 湘西植烟土壤养分管理分区研究[J]. *安徽农学通报*, 2019, 25(13): 119–122. Xiang D M, Li Q, Li J, *et al.* Study on soil nutrient management zoning of tobacco planting in Xiangxi[J]. *Anhui Agricultural Science Bulletin*, 2019, 25(13): 119–122.
- [20] 张云贵, 刘青丽, 李志宏, 等. 分散经营条件下烤烟精准养分管理研究[J]. *植物营养与肥科学报*, 2015, 21(4): 1066–1074. Zhang Y G, Liu Q L, Li Z H, *et al.* Research on the field-specific nutrient management of flue-cured tobacco in condition of decentralized operation[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2015, 21(4): 1066–1074.
- [21] 李文彪, 刘荣乐, 郑海春, 等. 内蒙古河套灌区春玉米推荐施肥指标体系研究[J]. *中国农业科学*, 2012, 45(1): 93–101. Li W B, Liu R L, Zheng H C, *et al.* Study on index system of optimal fertilizer recommendation for spring corn in Hetao irrigation area of Inner Mongolia[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2012, 45(1): 93–101.
- [22] 李文彪, 郑海春, 郜翻身, 等. 内蒙古河套灌区春小麦推荐施肥指标体系研究[J]. *植物营养与肥科学报*, 2011, 17(6): 1327–1334. Li W B, Zheng H C, Gao F S, *et al.* Study on index of fertilizer recommendation for spring wheat in Hetao irrigated area[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2011, 17(6): 1327–1334.
- [23] 刘疆, 翟丙年, 殷振江. 咸阳灌区冬小麦推荐施肥指标体系研究[J]. *西北农林科技大学学报(自然科学版)*, 2014, 42(6): 55–62. Liu J, Zhai B N, Yin Z J. Index system of fertilizer recommendation for winter wheat in Xianyang irrigation area[J]. *Journal of Northwest A&F University (Natural Science Edition)*, 2014, 42(6): 55–62.
- [24] 付莹莹, 同延安, 赵佐平, 等. 陕西关中灌区夏玉米土壤养分丰缺及推荐施肥指标体系的建立[J]. *干旱地区农业研究*, 2010, 28(1): 88–93. Fu Y Y, Tong Y A, Zhao Z P, *et al.* The establishment of soil nutrient abundance and fertilizer recommendation index system for summer maize in Guanzhong irrigation areas, Shaanxi Province[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2010, 28(1): 88–93.
- [25] 刘芬, 同延安, 王小英, 等. 陕西关中灌区冬小麦施肥指标研究[J]. *土壤学报*, 2013, 50(3): 556–563. Liu F, Tong Y A, Wang X Y, *et al.* Indices for fertilization of winter wheat in Guanzhong irrigation area of Shaanxi[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2013, 50(3): 556–563.
- [26] Fageria N K, Baligar V C, Jones C A. Growth and mineral nutrition of field crops[M]. Boca Raton, USA: CRC Press/Taylor & Francis Group, 2011.
- [27] Troeh F R, Thompson L M. Soil and soil fertility[M]. Iowa, America: Blackwell Publishing, 2005. 251–268.
- [28] 张福锁. 测土配方施肥技术要览[M]. 北京: 中国农业大学出版社, 2006. 93–110. Zhang F S. Technical overview of soil test and formula fertilization [M]. Beijing: China Agricultural University Press, 2006. 93–110.
- [29] 陈新平, 张福锁. 通过“3414”试验建立测土推荐施肥技术指标体系[J]. *中国农技推广*, 2006, 22(4): 36–39. Chen X P, Zhang F S. The technical index system of recommended fertilization for soil measurement was established through “3414” test[J]. *China Agricultural Technology Extension*, 2006, 22(4): 36–39.
- [30] 黄亿, 李廷轩, 张锡洲, 等. 基于“3414”试验的川中丘陵区油菜施肥指标体系构建[J]. *中国农业科学*, 2013, 46(10): 2058–2066. Huang Y, Li T X, Zhang X Z, *et al.* Establishment of fertilization recommendation indexes of rapeseed soil based on the “3414” field experiments in the middle of Sichuan hilly regions[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2013, 46(10): 2058–2066.
- [31] 戢林, 张锡洲, 李廷轩. 基于“3414”试验的川中丘陵区水稻测土配方施肥指标体系构建[J]. *中国农业科学*, 2011, 44(1): 84–92. Ji L, Zhang X Z, Li T X. Establishing fertilization recommendation index of paddy soil based on the “3414” field experiments in the middle of Sichuan hilly regions[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2011, 44(1): 84–92.
- [32] 宋朝玉, 高峻岭, 张清霞, 等. “3414”肥料试验结果统计分析方法的探讨[J]. *山东农业科学*, 2009, (9): 93–96. Song C Y, Gao J L, Zhang Q X, *et al.* Discussion on statistical analysis method of “3414” fertilizer test results[J]. *Shandong Agricultural Sciences*, 2009, (9): 93–96.
- [33] 孙义祥, 郭跃升, 于舜章, 等. 应用“3414”试验建立冬小麦测土配方施肥指标体系[J]. *植物营养与肥科学报*, 2009, 15(1): 197–203. Sun Y X, Guo Y S, Yu S Z, *et al.* Establish phosphorus and potassium fertilization recommendation index based on the “3414” field experiments[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2009, 15(1): 197–203.