

成都平原水旱轮作种植下土壤养分特性 空间变异研究*

秦鱼生 涂仕华 冯文强 孙锡发

(四川省农业科学院土壤肥料研究所,成都 610066)

SPATIAL VARIABILITY OF SOIL NUTRIENT CHARACTERISTICS UNDER PADDY-UPLAND CROP ROTATION IN CHENGDU PLAIN

Qin Yusheng Tu Shihua Feng Wenqiang Sun Xifa

(Soil and Fertilizer Institute, Sichuan Academy of Agricultural Science, Chengdu 610066, China)

关键词 土壤养分;空间变异;水旱轮作;成都平原
中图分类号 S158.9 文献标识码 A

肥料是作物的粮食,研究表明,施肥对粮食增产的贡献率可高达 50% 以上^[1]。但是,我国长期存在的盲目的、非精准的不合理施肥,导致肥料当季利用率较低,特别是氮、磷肥。这既增加了种植成本,又造成水体富营养化^[2,3]。土壤养分特性的空间变异研究对于实现田间土壤养分精准管理、变量施肥、提高肥料利用率等都具有非常重要的意义。国外对土壤养分特性空间变异的研究始于 20 世纪 70 年代,许多土壤学家将 GIS 和地统计学技术引入土壤学领域研究土壤属性的空间变异规律^[4,5],并取得很好的结果。国内自 90 年代中期以来,许多研究者都对土壤属性特别是土壤养分的空间变异进行了研究^[6~8],但主要侧重于对土壤物理性质和土壤盐分的空间变异研究,在区域上主要以北方旱地的土壤养分变异研究为主。最近两年,陈防^[9]、许红卫^[10]等对长江中、下游水网平原区稻田土壤养分空间变异进行了研究,但对水旱轮作种植稻田的土壤养分特性空间变异研究较少。本研究以成都平原水旱轮作典型种植区——广汉市西高乡两个自然村为研究对象,运用地统计学和 GIS 相结合的方法,对该研究区域的土壤养分特性的空间变异进行了研究,旨在了解水旱轮作种植稻田土壤养分的空间变异规律,

探索适合该类型稻田的土壤养分精准管理模式和合理采样方式,为目前全国正在开展的测土配方施肥行动提供技术指导。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区域位于四川省广汉市西北部,东经 104°10' ~ 104°12'、北纬 31°03' ~ 31°05' 之间,海拔 455 ~ 515 m,是典型的成都平原水田景观单元,总面积约为 90 hm²。土壤为再积黄泥水稻土,发育于全新统近代沱江水系冲积物^[11],土层浅薄,质地属中壤—重壤。该区为中亚热带湿润气候,年均温 17.8℃,年降水量 891 mm(集中于 7~9 月),年平均相对湿度 82%,年均无霜期 281 d。经调查,研究区域施肥以尿素、碳酸氢铵、过磷酸钙和专、通用复合肥为主,锌肥在水稻季的施用比例较大,有机肥主要是畜禽粪便。

1.2 基础图件

以四川省地质测绘院与四川省广汉市国土资源局 1992 共同绘制的 1:10 000 土地利用现状图为基础底图,采样时参考了广汉市国土资源局 1:5 000

* 国家科技支撑计划“粮食主产区农田肥水资源可持续高效利用技术研究”(2006BAD02A14)和四川省农业科学院青年基金项目共同资助
作者简介:秦鱼生(1978~),男,重庆合川人,助理研究员,主要从事植物营养与施肥、精准养分管理、农田环境保护等研究。E-mail: shengyuq@sohu.com

航空影像(2004)。

1.3 样品采集与分析

在研究区内采用正交网格法 100 m × 100 m 布点,利用手持式 GPS 仪定位。田间采样时,以坐标点为圆心,10 m 为半径,进行多点混合取样,取样深度为 0~25 cm,共采集土壤样品 75 个(图 1)。采样时间为 2004 年 11 月上旬,田间作物以油菜为主,苗高约 50 cm,已经施用基肥和苗肥,为避免施肥对样品分析结果的影响,采样时采集油菜行间中部土壤,并进行多点混合。



图 1 土壤样品采集点空间分布

土样采用土壤养分状况系统研究法(ASI)^[12]分析。结合区域的土壤特性和施肥状况,本研究选取了 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、速效磷、速效钾和有效钙、有效镁、有效锌,土壤有机质和 pH 作为分析对象。土壤速效磷(P)、速效钾(K)和有效锌(Zn)采用 ASI 联合浸提剂同时浸提,浸提剂为 $0.25 \text{ mol L}^{-1} \text{ NaHCO}_3 - 0.01 \text{ mol L}^{-1}$

$\text{EDTA} - 0.01 \text{ mol L}^{-1} \text{ NH}_4\text{F}$ 。土壤速效磷用钼锑抗比色法测定,速效钾和有效锌用原子吸收分光光度计测定。 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、有效钙和镁的浸提剂为 $1 \text{ mol L}^{-1} \text{ KCl}$ 溶液, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 用靛酚蓝比色法测定,有效钙和镁用原子吸收分光光度计测定。pH 用复合电极(水土比 2.5:1)测定。土壤有机质用 $0.2 \text{ mol L}^{-1} \text{ NaOH} - 0.01 \text{ mol L}^{-1}$ EDTA-2% 甲醇提取,比色法测定。

1.4 数据处理

采样点数据的基本特征参数统计和柯尔莫哥洛夫-斯米诺夫检验(K-S 检验)通过 SPSS12.0 完成。涉及地统计学的半方差函数及模型计算采用 GS+ 3.0(Camma Design Software)软件进行。研究以 ESRI 公司的 Arcview3.3 为 GIS 平台,养分插值主要在 Surfer8.0 中完成,通过 Arcview 3.x 的 Surfer 2.0 扩展模块,将 Surfer 中绘制的 ASCII 格式 Grid 输出为 Arc Grid 图形,再以研究区域边界范围切割相应的土壤养分含量分布图。

2 结果与分析

2.1 土壤养分的统计特征与正态分布性检验

运用传统的统计方法,对研究区域样本的各种土壤养分含量进行了描述性统计,其结果列于表 1。土壤 pH 在 5.80~7.45 之间,平均值为 6.45,属于酸性、微酸性水稻土;有机质含量在 $9.0 \sim 21.0 \text{ g kg}^{-1}$,中、低等水平; $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、速效磷和速效钾平均为 42.2 、 8.23 和 72.2 mg kg^{-1} ,均低于 ASI 法临界值水平 50、12 和 78 mg kg^{-1} ^[13];有效钙、镁和锌的平均含量均高于临界值水平。

表 1 土壤养分特性描述性统计分析

项目	pH	有机质 (g kg^{-1})	铵态氮	速效磷 速效钾 有效钙 有效镁 有效锌 (mg kg^{-1})				
				速效磷	速效钾	有效钙	有效镁	有效锌
样本数	75	75	75	75	75	75	75	75
最小值	5.80	9.00	25.0	2.80	35.2	3 018	273	1.35
最大值	7.45	21.0	66.9	29.7	109	8 757	792	3.80
平均值	6.45	15.6	42.3	8.23	72.2	5 706	508	2.30
标准差	0.373	2.18	11.1	5.24	18.4	1 140	90.8	0.677
变异系数(%)	5.78	14.0	26.4	63.7	25.1	20.0	17.9	29.5
偏度	0.383	-0.192	0.575	2.32	0.025	0.805	1.26	0.771
峰度	-0.330	0.136	-0.430	6.50	-1.01	1.08	3.60	-0.363
K-S P	0.483	0.472	0.353	0.015	0.264	0.440	0.103	0.200
对数转化后 K-S P	—	—	—	0.294	—	—	—	—

土壤速效磷含量变异系数高于 50%, 显示出高度的变异性; $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、速效钾和锌变异系数介于 20%~30% 间, 属于中度变异; 而 pH、OM、有效钙和镁的变异系数低于 20%, 变异较弱。土壤中养分含量的变异系数取决于该养分是否由施肥补充、施用量大小和养分在土壤中的可移动性。通常情况下, 土壤中变异系数较大的养分, 多与施肥有关, 如 N、P、K 和 Zn; 反之, 则与施肥关系较小, 如 Ca 和 Mg; 在受施肥影响的养分中, 作物吸收量相对较高、移动性大、后效较低的元素, 一般变异系数相对降低, 如 N、K; 而 P 因在土壤中移动性较小而变异系数较大; Zn 则因为施用量低而变异系数小。这些变化也反映了成都平原个体分散经营生产下的施肥差异, 与高义民等^[14]在陕西省新集村的研究结果相似。

样本原始数据经柯尔莫哥洛夫-斯米诺夫正态分布概率检验法(K-S 检验)检验后的参数值列于表 1, 所有分析的土壤养分特性均显示出一定的偏斜效应。除速效磷外, 其他项目的 K-S 显著水平值(K-S P)均大于 0.05, 数据符合正态频率分布, 能直接在半方差函数分析系统中使用。土壤速效磷含量经对数转化后其 K-S P 值也大于 0.05, 因此, 转化后的数据可对其进行 Kriging 插值。

2.2 土壤速效养分的空间变异特征

以采样间距 100 m 为步长, 经 GS+ 软件分析后的土壤速效养分理论半方差函数模型的参数值见表 2。模型的选择取决于变异函数理论模型的五个拟合参数, 首先考虑决定系数 R^2 , 其次是残差 RSS, 然

后才是变程和块金值的大小。依据这一原则, 对研究区域不同的养分选择了不同变异函数模型, 主要有线性、高斯、球状和指数四种模型。

由于表中数据未经标准化处理, 因此块金值和基台值的单位与项目一致。所有项目的 C_0 值均大于 0, 说明均存在由于采样误差、短距离变异或分析引起的各种正基底效应。本研究中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和速效钾的 $C/(C_0 + C) > 75$, 具有较弱的空间自相关性, 这表明研究区域的农民氮肥施用量比较接近, 随机性因素作用小, 这与浙江水网稻田平原区 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 受随机性因素如施肥、耕作措施、种植制度等人为活动的影响较小的研究结果一致^[15]。其余养分项目的 $C/(C_0 + C)$ 均介于 25~75 间, 具有中等空间自相关性, 是结构性因素和随机性因素共同影响的结果。土壤 pH、有机质和速效养分的空间依赖性排序为: $\text{pH} > \text{Mg} > \text{Zn} > \text{Ca} > \text{P} > \text{NH}_4^+\text{-N} > \text{OM} > \text{K}$, 变程值均大于取样间距 100 m, 这种结果表明 pH、Mg、Zn 和 Ca 在研究区域的含量分布趋于大斑块状变异, 而 K、OM 等元素的空间分布趋向于小斑块, 景观结构较破碎。从合理的取样间距来看, 不同土壤属性间的合理取样间距差异较大, K、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 OM 取样间距应小, 200 m 的取样网格较为理想; 而 pH、Mg 的取样间距可以超过 1 km; Ca 为 440 m, Zn 约为 700 m。 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、K 和 Ca 的最优拟合模型为球状, OM、P 和 Mg 的拟合更接近于高斯模型, Zn 和 pH 分别选择了指数和线性模型为最优模型。模型的决定系数范围为 0.267~0.754, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的拟合程度最好, 其次为 K 和 Ca, 而以 pH 最差。

表 2 土壤养分理论半方差函数模型及其参数

项目	模型	块金值 C_0	基台值 $C_0 + C$	$C/(C_0 + C)$ (%)	变程(m)	决定系数 R^2	RSS
pH	线性	0.10	0.30	66.8	3 474	0.267	4.80E-02
OM	高斯	0.50	1.30	64.0	203	0.307	7.05E-01
$\text{NH}_4^+\text{-N}$	球状	19.1	126	84.9	249	0.754	9.43E+02
P	高斯	0.044	0.12	63.3	392	0.385	8.01E-03
K	球状	56.3	343	83.6	183	0.434	8.39E+03
Ca	球状	1 118 000	3 355 345	66.7	440	0.423	2.36E+12
Mg	高斯	6 850	25 712	73.4	1 339	0.403	1.74E+08
Zn	指数	0.13	0.47	73.4	684	0.421	1.33E-02

研究区域土壤样本各种养分特性的分形维数(D)分析结果列于表 3。pH 在正北方向(0°)的分维数相对较小, 在其他三个方向相对较高且差异不大, 这表明 pH 在正北方向的空间自相关性较强, 空间变异较大。OM 在东北—西南方向(45°)的分维数相

对较小, 空间变异较大, 而在东南—西北方向(135°)空间变异较小。大量元素 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、速效磷和速效钾均在正北方向(0°)和东北—西南方向(45°)有较小的分维数, 说明其在这两个方向上空间异质性较强, 分布复杂; 从全方位来看, 速效磷的分维数相对较

表3 不同土壤养分特性的空间分形维数分析

方位	项目	pH	OM	NH ₄ ⁺ -N	P	K	Ca	Mg	Zn
0°	D	1.722	1.884	1.777	1.453	1.505	1.928	1.870	1.895
	R ²	0.634	0.297	0.562	0.528	0.482	0.374	0.257	0.217
45°	D	1.975	1.683	1.829	1.159	1.594	1.852	1.919	1.949
	R ²	0.019	0.213	0.152	0.313	0.365	0.425	0.030	0.065
90°	D	1.939	1.893	1.991	1.831	1.993	1.988	1.943	1.971
	R ²	0.141	0.473	0.023	0.240	0.005	0.004	0.085	0.294
135°	D	1.997	1.935	1.812	1.978	1.872	1.929	1.909	1.939
	R ²	0.002	0.175	0.662	0.010	0.880	0.399	0.368	0.297
全方位	D	1.991	1.951	1.939	1.899	1.960	1.954	1.919	1.967
	R ²	0.083	0.258 *	0.267 *	0.392 **	0.276 *	0.212	0.345 **	0.223

注: $R_{0.05}^2 = 0.23$, $R_{0.01}^2 = 0.29$

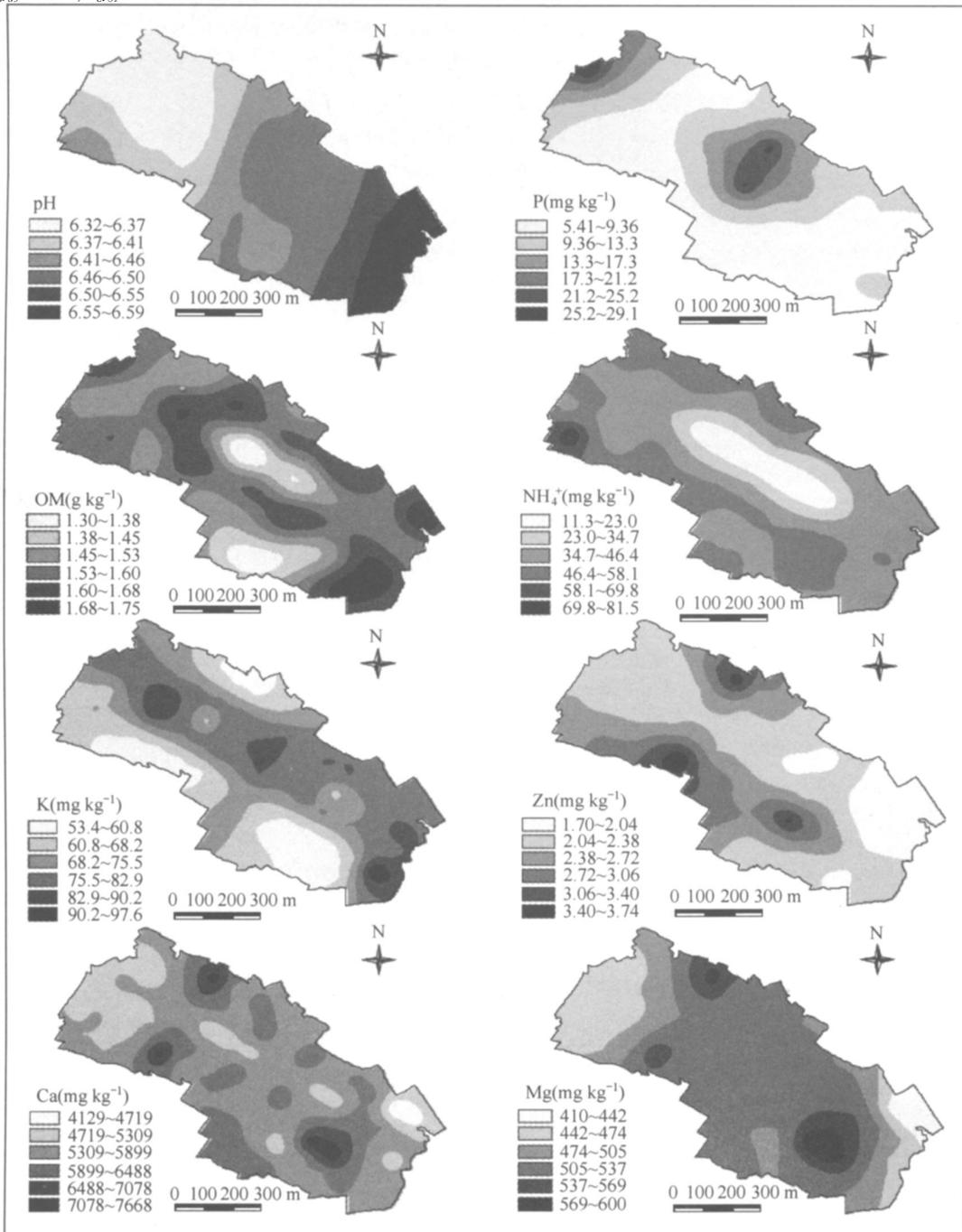


图2 土壤各种养分 Kriging 插值图

小,空间分布更复杂,而 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和速效钾相对较大,分布更均匀。有效钙、镁和锌在四个方向的分维数 D 均相对较高,并且差异不大,均一程度较好。决定系数 R^2 用来说明半方差函数模型中步长和半方差的双对数曲线的拟合程度^[16]。从全方位的决定系数来看,拟合较差的为pH, R^2 仅为0.083;速效磷的拟合程度最好, R^2 为0.392。

2.3 土壤养分的最优 Kriging 插值

研究区各种土壤特性的空间插值结果见图2。pH插值图呈条块状分布,沿西北—东南方向逐渐降低,值的范围为6.32~6.59,属微酸性土。速效磷图为点状与块状结合,在中部和西北部分布有两个高点,其余位置的差异较小。OM与 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的空间分布规律有相似性,中部有一块低点,向四周逐步提高,但OM图的更零星,变异更大。速效钾与Ca、Mg元素的分布在空间上具有负相关性,Ca和Mg分布图上的3个高含量点完全重合,而这3个斑点区则正处于速效钾的低含量分布带中,这可能与K和Ca、Mg间在土壤中具有一定的拮抗作用有关^[17]。

3 结 论

1) 土壤样本养分特性的原始数据存在一定程度偏斜效应,使用柯尔莫哥洛夫-斯米诺夫正态分布概率检验法(K-S检验)对原始数据进行分析后,除速效磷外,其余项目的K-S显著水平值均大于0.05,能直接在半方差函数分析系统中使用,而速效磷经对数转化后,排除了异常值对后面分析结果的干扰。

2) 各种养分半方差函数理论模型的参数值差异较大,依据最优模型选择的原则,本研究区域养分主要适用四种函数模型(线性、球状、高斯和指数模型)。土壤的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和速效钾的空间自相关性弱,有效磷、钙和镁等的空间自相关性中等。

3) 不同养分在空间四个方向(0° 、 45° 、 90° 和 135°)上的分维数差异较大, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、速效磷和速效钾在 0° 方向和 45° 方向的分维数较小,养分的空间异质性较大;有效钙、镁和锌在各个方向的空间异质性较小。

4) 养分 Kriging 插值图较好地反映了土壤养分的空间分布特点,制图结果为精准农业的养分分区管理和分区变量施肥提供了理论参考。

参 考 文 献

- [1] Stewart W M, Dibb D W, Johnston A E, *et al.* The contribution of commercial fertilizer nutrients to food production. *Agron. J.*, 2005, 97: 1~6
- [2] 高祥照, 马文奇, 杜森, 等. 我国施肥中存在问题的分析. *土壤通报*, 2001, 32(6): 258~261
- [3] 郭怀成, 孙延枫. 滇池水体富营养化特征分析及控制对策探讨. *地理研究*, 2002, 21(5): 500~506
- [4] 金继运. “精准农业”及其在我国的应用前景. *植物营养与肥料学报*, 1998, 4(1): 1~7
- [5] 石元春. 土壤学的数字化和信息化革命. *土壤学报*, 2000, 37(4): 289~295
- [6] Zhang S R, Sun B, Zhao Q G, *et al.* Temporal-spatial variability of soil organic carbon stocks in rehabilitating ecosystem. *Pedosphere*, 2004, 14(4): 501~507
- [7] 姚荣江, 杨劲松, 刘广明, 等. 黄河三角洲地区典型地块土壤盐分空间变异特征研究. *农业工程学报*, 2006, 22(6): 61~66
- [8] 姚丽贤, 周修冲, 蔡永发, 等. 不同采样密度下土壤特性的空间变异特征及推估精度研究. *土壤*, 2004, 36(5): 538~542
- [9] 陈防, 刘冬碧, 熊桂云, 等. 中亚热带两种水稻土土壤养分空间变异的对比研究. *土壤学报*, 2006, 43(4): 688~693
- [10] 许红卫, 高克异, 王珂, 等. 稻田土壤养分空间变异与合理取样数研究. *植物营养与肥料学报*, 2006, 12(1): 37~43
- [11] 四川省广汉市《广汉县志》编纂委员会. 广汉县志. 成都: 四川人民出版社, 1992. 63~68
- [12] 吴荣贵. 土壤基本肥力的快速分析与应用前景. 见: 加拿大钾磷研究所北京办事处. 土壤养分状况系统研究法. 北京: 中国农业科技出版社, 1992. 54~70
- [13] 杨俐苹, 自由路. 精准农业中的土壤养分快速测定技术. 见: 金继运, 自由路. 精准农业与土壤养分管理. 北京: 中国大地出版社, 2001. 152~160
- [14] 高义民, 同延安, 胡正义, 等. 黄土区村级农田土壤养分空间变异特征研究. *土壤通报*, 2006, 37(1): 1~6
- [15] 姜丽娜, 符建荣, 范浩定. 水网平原稻田土壤养分空间变异特性研究. *中国水稻科学*, 2005, 19(2): 153~159
- [16] 彭凌云, 甘海华, 吴靖宇. 江门市新会区耕地土壤有效性 Si, Ca, Mg 的空间变异特征. *水土保持学报*, 2005, 19(2): 80~83
- [17] 姜勇, 张玉革, 梁文举, 等. 耕地土壤中交换态钙镁铁锰铜锌相关关系研究. *生态环境*, 2003, 12(2): 160~163