

· 热带作物 ·

DOI: 10.15886/j.cnki.rdswwb.20240046



主持人:徐冉 张洪亮

海南岛主要农田耕层土壤磷的空间分布特征

张善恒¹, 王文斌^{2,3}, 张永发^{2,3}, 罗雪华^{2,3}, 薛欣欣^{2,3}, 赵春梅^{2,3},
任常琦^{2,3}, 王禹^{2,3}, 吴晓霜^{2,3}, 耿建梅¹

(1. 海南大学 热带农林学院, 海口 570228; 2. 中国热带农业科学院 橡胶所, 海口 571101;
3. 中国热带农业科学院 土壤肥料研究中心, 海口 571101)

摘要: 为了探究农田耕层土壤磷素含量的空间分布特征, 了解土壤磷素积累状况, 为农田磷肥的合理施用提供依据, 以海南岛主要农田为研究对象, 采集耕层土壤混合样品2 386个, 分析检测土壤全磷、有效磷和有机质等指标, 运用地统计学方法分析了土壤全磷和有效磷的空间自相关性, 采用普通克里格插值法预测了海南岛主要农田耕层土壤全磷和有效磷的空间分布情况。结果表明: 海南岛主要农田耕层土壤全磷和有效磷含量较高且变异性较强, 土壤全磷含量为 $0.06 \sim 4.61 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 均值达 $1.02 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 变异系数为64%; 土壤有效磷含量为 $3.16 \sim 478.88 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 均值为 $106.51 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 变异系数高达91%。土壤全磷和有效磷的块金系数分别为0.918和0.928, 都属于较弱的空间自相关性, 主要受随机因素影响。克里格插值预测图显示, 海南岛北部和南部地区的土壤全磷含量较高, 主要集中在 $0.8 \sim 4.61 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 之间; 东部和西部地区的土壤全磷含量相对偏低, 主要分布范围为 $0.4 \sim 0.8 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$; 土壤的有效磷含量整体偏高, 北部地区土壤有效磷含量为 $3.16 \sim 478.88 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 土壤有效磷分布不均衡; 南部地区土壤的有效磷集中分布在 $90 \sim 240 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 之间, 东部和西部地区的土壤有效磷含量相对较低, 集中分布在 $20 \sim 90 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 之间。海南岛农田土壤全磷和有效磷的含量多处于较高水平, 受人为施肥影响较大, 农田周边水体面临较大的污染风险, 在农业生产中应控制磷肥的施用。

关键词: 地理信息系统; 有效磷; 地统计分析; 空间分布; 土地利用类型

中图分类号: S153.6

文献标志码: A

文章编号: 1674-7054 (2024) 05-0520-11

张善恒, 王文斌, 张永发, 等. 海南岛主要农田耕层土壤磷的空间分布特征 [J]. 热带生物学报, 2024, 15(5): 520-530.
doi: 10.15886/j.cnki.rdswwb.20240046

磷是作物生长发育所必需的营养元素之一, 合理施用磷肥会显著提升土壤有效磷的含量, 对作物的增产起到至关重要的作用^[1]。另一方面, 磷肥施入土壤后易被无定形铁铝氧化物等吸附固定^[2], 作物难以吸收利用, 且作物对磷的需求远低于氮或钾, 在生产中施用含磷量高的肥料容易造成磷素的积累, 例如海南农民习惯施用 $\text{N}:\text{P}_2\text{O}_5:\text{K}_2\text{O}=1:1:1$ 的复合肥, 作物收获所带走的磷远低于施肥所供给的磷^[3], 未被作物吸收利用的磷会在土壤中积累, 当积累量达到土壤素的环境阈值后, 土壤磷会

通过径流、渗漏和侵蚀等方式进入到水体, 引发水体的富营养化^[4]。因此, 磷肥的合理施用才能起到作物增产的效果, 过量施用则易引发水体环境的污染。土壤中的有效磷既可作为评价土壤磷素丰缺状况的指标, 也可通过该指标来预测土壤现有磷素对水体污染的风险性^[5]。鲁如坤^[6]认为, 当红壤的有效磷达 $60 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时, 将出现水溶磷, 对水体环境具有很大威胁。Jalali 等^[7]的研究结果表明, 土壤中的有效磷保持在 $26 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时, 作物的产量和磷的利用率可以得到最大限度的提高。因

收稿日期: 2024-03-21

修回日期: 2024-04-06

基金项目: 海南耕地改良关键技术研究示范重大专项(HNGDzy201501)

第一作者: 张善恒(1998-), 男, 海南大学热带农林学院2021级硕士研究生。E-mail: 1195031963@qq.com

通信作者: 耿建梅(1977-), 女, 副教授。研究方向: 土壤肥力、植物营养与环境保护。E-mail: 616295256@qq.com

此,掌握农田有效磷的含量,对磷肥的后续施用和水体环境的保护具有重要意义。当前,国内外常采用GIS(Geographic Information System)和地统计学相结合的方法研究土壤养分的空间分布。GIS拥有强大的数据管理功能,但无法做到详细的空间分析;地统计学则相反,二者相结合可以充分发挥自身的优势^[8]。研究表明,我国北方旱地土壤有效磷均值为 $23.20 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,有效磷同样受到2种因素的共同影响^[9]。范声浓等^[10]的研究表明,海南芒果园的有效磷含量均值已达 $119.06 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,土壤磷素面临较高的磷素流失风险。2020年,海南省的海口市和文昌市土壤有效磷均值分别高达 $88.65 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $93.41 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ^[11-12]。不同地区的土壤有效磷含量存在差异,海南省土壤养分的调查多集中于某一市县或特色作物种植区域,而关于海南省大尺度农田土壤磷素含量的空间分布和空间自相关性的研究未见报道。

海南岛的大田洋是指 133.3 hm^2 以上的连片田块,主要分布在海南岛四周的平地,是海南省耕地的重要组成部分,本研究在海南岛208个大田洋内采集了2 386个耕层土壤样品,测定土壤全磷与有效磷含量,采用GIS和地统计学相结合的方法来预测土壤全磷和有效磷的分布状况,研究其空间自相关性,旨在探明海南主要农田中土壤磷素含量水平,可为合理施用磷肥提供数据参考。

1 材料与方法

1.1 研究区概况 海南省地处北纬 $18^{\circ}10'$ — $20^{\circ}10'$,东经 $108^{\circ}37'$ — $111^{\circ}03'$,位于热带北部边缘地区,是我国唯一的热带省份。海南岛地势四周低平,中间高耸,全岛以山地和丘陵等地形为主,其

中山地主要位于海南岛中部,并夹杂有部分的丘陵和盆地;丘陵主要分布在岛内陆和西北、西南等地区。海南地区属热带季风气候,四季不分明,年平均气温在 $22.5 \sim 25.6^{\circ}\text{C}$,年平均降雨量达 $923 \sim 2\,459 \text{ mm}$ 。岛内含有花岗岩、砂页岩、玄武岩和石灰岩等多种成土母质,受多种因素综合影响,全省土壤类型在地域上存在一定的差异,地带性土壤主要有砖红壤、黄壤、赤红壤和燥红土等土类,非地带性土壤有紫色土、石灰土、石质土和水稻土等。

1.2 土壤样品采集与测定 土壤样品于2015年6月—11月采集,采样对象为海南岛主要农田,即208个大田洋(133.3 hm^2 以上的连片耕地),每个大田洋采集10~15个0~20 cm耕作层土壤样品(每个样品按S形路线采集10个点混匀)。总共采集2 386个土样,带回实验室风干、磨细过筛,待用。五指山市、琼中及白沙等地多以山地和丘陵为主,没有集中成片的大田洋,因此,本次采样没有涉及上述区域。

土壤样品理化性质的测定采用常规分析方法:全磷采用NaOH-碱熔-流动分析仪法测定;有效磷采用氟化铵-盐酸溶液浸提-流动分析仪法和碳酸氢钠浸提-流动分析仪法测定;土壤pH采用电位法测定;土壤容重采用环刀法测定;有机质采用燃烧氧化-非分散红外法测定;阳离子交换量采用EDTA-乙酸铵交换法测定;速效钾采用乙酸铵浸提-火焰光度计法测定;全钾采用NaOH熔融-火焰光度计法测定;交换性钙、镁采用原子吸收分光光度法测定。

1.3 土壤全磷及有效磷丰缺指标评价标准 海南岛农田土壤全磷及有效磷含量丰缺分级标准参考全国第二次土壤普查的土壤养分分级标准^[13],详见表1。

表1 海南岛农田全磷及有效磷含量分级标准

Tab. 1 Classification standard of total phosphorus and available phosphorus content in farmland of Hainan Island

指标 Index	一级 Level 1	二级 Level 2	三级 Level 3	四级 Level 4	五级 Level 5
全磷 total phosphorus/($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	> 1.0	0.8 ~ 1.0	0.6 ~ 0.8	0.4 ~ 0.6	≤ 0.4
有效磷 Available phosphorus/($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	> 40.0	30.0 ~ 40.0	20.0 ~ 30.0	5.0 ~ 20.0	≤ 5.0

1.4 数据处理方法

1.4.1 半方差函数和克里格插值法 半方差函数是用于描述土壤特性空间变异结构的关键函数,可以反映出不同距离观测值的变异情况,以及模

拟研究对象空间变异结构的探测值和变量值^[14]。其公式为:

$$r(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [Z(x_i + h) - Z(x_i)]^2,$$

式中: $r(h)$ 为半方差函数; h 为样本的间隔距离; $N(h)$ 为间距是 h 的观测样点的成对数; $Z(x_i+h)$ 与 $Z(x_i)$ 代表区域变量 $Z(x)$ 在 x_i 与 x_i+h 点的测定值。

克里格插值法(Kriging)十分依赖统计理论和大量的计算工作,是一种应用比较广泛的插值技术,该类方法是利用区域变量的结构特点及不同的研究目的,在有限区域对未采样区域变量进行线性无偏估计的方法,其可以利用半方差函数描述样点间的空间关系,从而将实测样点值和估计值相联系,产生与插值有关的误差估计值,可提供必需的插值精度^[15]。其公式为:

$$Z^*(x_0) = \sum_{i=1}^n \lambda_i Z(x_i),$$

式中: λ_i 是赋予观测值 $Z(x_i)$ 的权重,表示各观测值对估计值的贡献,其和为1,在保证估计值无偏性和最优性的条件下,可由变量半方差函数计算得到。

1.4.2 数据处理软件 本研究所用地图数据来源于《30 m annual land cover and its dynamics in China from 1990 to 2019》^[16],其中包含我国各省的土地利用和土地覆盖数据,将海南岛的土地利用类型通过ArcGIS软件提取以后用于插值分析,所用坡度及坡向数据提取自“地理空间数据云-GDEM V2 30M分辨率数字高程数据”。

供试样品检测数据及样点地理坐标信息整理于Excel中,剔除异常值(不在 $\bar{x} \pm 3S$ 区间内)后剩余2 286个采样点,导入SPSS软件后获取数据的最大值、最小值及均值等信息,同时检验数据是否符合正态分布,为后续的半方差分析做准备。地理坐标度分秒信息于Excel中经函数转化十进制后导入ArcGIS软件,将地理坐标系转换为投影坐标系后导入GS+9.0软件进行半方差分析,根据最大回归系数(R^2)和最小残差平方和(RSS)来挑选最适合的理论模型,在挑选的最优模型的基础上,采用Arcgis10.2软件中的地统计分析模块对全磷和有效磷插值,最终得到两者的含量分布图。“地理空间数据云-GDEM V2 30M分辨率数字高程数据”,数据经ArcGIS软件工具箱模块镶嵌为新栅格数据后,通过掩膜提取及多值提取至点等功能提取本研究采样点位的坡向及坡度数据,采用Origin软件绘制土壤全磷和有效磷与pH、有机质和土地利用类型等指标的相关性分析图。

2 结果与分析

2.1 海南岛大田洋土壤全磷、有效磷含量统计特征 土壤中的全磷含量范围为0.06 ~ 4.61 g·kg⁻¹,均值为1.02 g·kg⁻¹,变异系数达64%(表2),按照全国第二次土壤普查的土壤养分分级标准进行等级划分,土壤样品中全磷含量处于一级水平的占40%,全磷均值也已经达到一级水平。

海南各市县中,土壤全磷含量平均值最高的是三亚市,达到了2.37 g·kg⁻¹,其次是海口市(1.21 g·kg⁻¹)、临高县(1.21 g·kg⁻¹)和儋州市(1.13 g·kg⁻¹),定安县、琼海市和澄迈县的全磷含量平均值也都大于1 g·kg⁻¹。土壤全磷含量平均值最低的是昌江县,仅为0.67 g·kg⁻¹。

从样点分级数量占比来看,澄迈县的全磷一级水平占比最高,达到87%,其次是海口市(60%)、琼海市(58%)、临高县(53%)、定安县(51%)和三亚市(50%);昌江县土壤全磷含量一级水平占比最低,仅为12%;文昌市全磷含量平均值较低,大部分处于五级水平,占比为40%。

土壤有效磷含量范围为3.16 ~ 478.88 mg·kg⁻¹,均值为106.51 mg·kg⁻¹,变异系数高达91%,有72%的土壤样品有效磷含量处于一级水平(表3)。

各市县土壤有效磷含量平均值最高的是澄迈县,为231 mg·kg⁻¹,其次是琼海市(161.74 mg·kg⁻¹)、定安县(152.39 mg·kg⁻¹)、乐东县(145.15 mg·kg⁻¹)。土壤有效磷含量平均值最低的同样为昌江县(63.90 mg·kg⁻¹),但还是处于一级水平。从分级占比来看,各市县的土壤有效磷含量基本都处于一级水平,其中同样以澄迈县占比最高,有效磷含量一级水平占比100%。其次为定安县(99%)、三亚市(94%)、琼海市(93%)和陵水县(93%)。各市县超过50%以上的样点有效磷含量达到一级水平,其中昌江县达到一级水平的样点占比最低,为56%。儋州市有25%的样点有效磷含量处于四级水平,各市县土壤全磷和有效磷的差异性可能与其种植结构不同有关。

2.2 不同土地利用类型下土壤全磷及有效磷统计特征 本次采样所涉及的土地利用类型主要为水田和旱地,少部分的林木和花卉种植地则将其归为其他类型(表4、表5)。不同土地利用类型的土壤全磷均值大小顺序为:旱地(1.07 g·kg⁻¹) > 水田

表2 海南岛各市县大田洋土壤全磷含量描述性统计特征

Tab. 2 Descriptive statistical characteristics of total phosphorus content in Datianyang soils in different regions of Hainan Island

市县 County	样点数 Sample size	最小值 Min/ (g·kg ⁻¹)	最大值 Max/ (g·kg ⁻¹)	均值 Mean/ (g·kg ⁻¹)	标准差 SD	CV/ %	全磷含量等级百分比 Percentage of total phosphorus content grade/%				
							一级 Level 1	二级 Level 2	三级 Level 3	四级 Level 4	五级 Level 5
							> 1.0	0.8 ~ 1.0	0.6 ~ 0.8	0.4 ~ 0.6	≤ 0.4
保亭 Baoting	14	0.46	1.75	0.87	0.30	34	14	36	36	14	0
昌江 Changjiang	124	0.17	2.44	0.67	0.30	50	12	17	25	25	21
澄迈 Chengmai	72	0.60	2.66	1.00	0.54	35	87	8	4	1	0
儋州 Danzhou	318	0.25	3.20	1.13	0.55	54	40	15	18	18	9
定安 Dingan	67	0.09	3.92	1.13	0.60	52	51	17	25	6	1
东方 Dongfang	235	0.12	2.24	0.71	0.34	48	16	16	16	25	17
海口 Haikou	371	0.06	3.63	1.21	1.24	48	60	15	16	7	2
乐东 Ledong	209	0.07	2.88	0.88	0.49	5	37	16	13	17	17
临高 Lingao	182	0.11	3.48	1.21	0.66	54	53	18	13	13	3
陵水 Lingshui	85	0.18	4.22	0.98	0.66	66	34	14	14	30	8
琼海 Qionghai	79	0.15	3.40	1.12	0.63	56	58	17	9	4	12
三亚 Sanya	29	0.26	4.61	2.37	1.53	64	50	10	13	15	12
屯昌 Tunchang	39	0.08	1.68	0.93	0.32	34	36	26	33	3	2
万宁 Wanning	260	0.09	3.41	0.81	0.49	60	30	12	15	25	18
文昌 Wenchang	201	0.12	4.45	0.82	0.85	103	26	5	12	17	40
全部 ALL	2286	0.06	4.61	1.02	0.65	64	40	14	17	16	13

(0.99 g·kg⁻¹) > 其他类型(0.66 g·kg⁻¹),旱地全磷含量一级占比 40%,略高于水田一级占比(38%),旱地和水田的全磷含量在二级到五级之间的差异较小;其他类型的土壤全磷含量一级占比最低,仅为 14%,土壤全磷含量主要分布在三级到五级。

旱地的有效磷均值(113.68 mg·kg⁻¹)略高于水田(104.66 mg·kg⁻¹),其他类型的有效磷含量较低,

为 62.82 mg·kg⁻¹。不同土地利用类型的土壤有效磷含量均以一级占比最高,旱地有效磷含量一级占比 77%,略高于水田一级占比(72%);其他类型的土壤有效磷含量一级占比最低,为 53%,有 27%的样点有效磷含量处于四级水平。

2.3 海南岛大田洋土壤全磷和有效磷与其他指标的相关性 各指标的相关性分析表明(图 1),

表3 海南岛各市县大田洋土壤有效磷含量描述性统计特征

Tab. 3 Descriptive statistical characteristics of available phosphorus content in Datianyang soils in different regions of Hainan Island

市县 County	样点数 Sample size	最小值 Min/ (mg·kg ⁻¹)	最大值 Max/ (mg·kg ⁻¹)	均值 Mean/ (mg·kg ⁻¹)	标准差 SD	CV/ %	有效磷含量等级百分比 Available phosphorus content level percentage/%				
							Level 1 Level 2 Level 3 Level 4 Level 5				
							> 40.0	30.0 ~ 40.0	20.0 ~ 30.0	5.0 ~ 20.0	≤5.0
保亭 Baoting	14	10.00	211.21	90.50	53.07	59	85	0	0	15	0
昌江 Changjiang	124	8.65	448.94	63.90	61.23	96	56	13	18	13	0
澄迈 Chengmai	72	55.42	464.39	231.00	116.68	50	100	0	0	0	0
儋州 Danzhou	318	3.16	405.65	66.28	69.02	104	57	9	9	25	0
定安 Dingan	67	27.95	444.29	152.39	95.30	63	99	0	1	0	0
东方 Dongfang	235	4.63	467.88	90.41	79.44	88	68	8	6	18	0
海口 Haikou	371	5.32	467.29	94.01	93.98	100	65	9	14	12	0
乐东 Ledong	209	14.39	465.99	145.15	107.07	74	90	4	4	2	0
临高 Lingao	182	6.01	445.49	121.00	101.69	84	78	3	9	10	0
陵水 Lingshui	85	8.99	404.56	119.06	79.51	67	93	4	2	1	0
琼海 Qionghai	79	27.27	478.88	161.74	114.16	71	93	7	3	0	0
三亚 Sanya	29	10.15	459.90	144.22	97.87	68	94	0	2	4	0
屯昌 Tunchang	39	11.30	364.46	110.95	95.39	86	77	5	10	8	0
万宁 Wanning	260	6.19	401.81	86.06	83.91	98	60	9	19	12	0
文昌 Wenchang	201	8.04	419.92	89.02	71.49	80	70	6	10	14	0
全部 ALL	2 286	3.16	478.88	106.51	97.40	91	72	7	9	12	0

全磷与有效磷、有机质、全氮、速效钾、碱解氮、CEC、交换性钙镁呈极显著性正相关($P < 0.01$),与pH和容重呈极显著性负相关($P < 0.01$);有效磷与容重、pH和全钾、速效钾呈极显著性正相关($P < 0.01$),与CEC、交换性钙镁、全氮、有机质和农作物呈极显著性负相关($P < 0.01$)。有效磷及全磷与坡向和坡度之间没有表现出显著的相关

性,其原因可能与采样点位多数处于地势平坦地区有关。

2.4 海南岛大田洋土壤全磷、有效磷半方差函数分析 土壤全磷和有效磷数据未呈现正态分布,因此采用Minnitab软件对数据进行BOX-COX转换,转换后的数据呈现正态分布。半方差函数一般包含块金值、基台值和变程,其中块金值(C0)由

表 4 不同土地利用类型下土壤全磷含量描述性统计特征

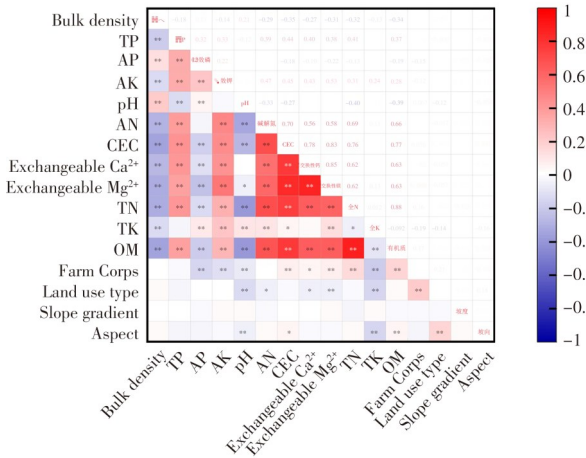
Tab. 4 Descriptive statistical characteristics of soil total phosphorus content under different land use types

土地利用类型 Land use type	样点数量 Sample size	最小值 Min/ (g·kg ⁻¹)	最大值 Max/ (g·kg ⁻¹)	均值 Mean (g·kg ⁻¹)	标准差 SD	CV/%	全磷含量等级百分比 Percentage of total phosphorus content grade/%				
							一级	二级	三级	四级	五级
							Level 1 > 1.0	Level 2 0.8 ~ 1.0	Level 3 0.6 ~ 0.8	Level 4 0.4 ~ 0.6	Level 5 ≤ 0.4
旱地 Dryland	500	0.08	4.49	1.07	0.78	72	40	14	14	16	16
水田 Paddyfiel	1 684	0.06	4.61	0.99	0.59	60	38	14	18	16	14
其他类型 Other types	102	0.12	1.69	0.66	0.34	51	14	15	24	24	23

表 5 不同土地利用类型下有效磷含量描述性统计特征

Tab. 5 Descriptive statistical characteristics of available phosphorus content under different land use types

土地利用类型 Land use type	样点数量 Sample size	最小值 Min/ (mg·kg ⁻¹)	最大值 Max/ (mg·kg ⁻¹)	均值 Mean/ (mg·kg ⁻¹)	标准差 SD	CV/ %	有效磷含量等级百分比 Available phosphorus content level percentage/%				
							一级	二级	三级	四级	五级
							Level 1 > 40.0	Level 2 230.0~ 40.0	Level 3 320.0~ 30.0	Level 4 420.0~ 5.0	Level 5 ≤5.0
旱地 Dryland	500	5.20	478.88	113.68	103.46	91	77	5	8	10	0
水田 Paddyfiel	1 684	3.16	467.29	104.66	92.90	89	72	6	10	11	1
其他类型 Other types	102	8.65	448.94	62.82	67.01	106	53	7	13	27	0



* $P \leq 0.05$ ** $P \leq 0.01$ 。Bulk density-容重; TP-全磷; AP-有效磷; AK-速效钾; AN-碱解氮; CEC-阳离子交换量; Exchangeable Ca²⁺-交换性钙; Exchangeable Mg²⁺-交换性镁; TN-全氮; TK-全钾; OM-有机质; Farm Corps-农作物; Land use type-土地利用类型; Slope gradient-坡度; Aspect-坡向。

图 1 各指标间相关性统计表

Fig. 1 Statistical table of correlation among indicators

随机误差和小于实验取样尺度的某种因素引起的变异,基台值(C0+C)为人为的区域引起的变异,块金系数(C0/(C0+C))则用于表明变量的空间相关程度。在<0.25时,具有强烈的空间自相关性,主要受到结构性因素(母质、地形等)的影响;在0.25~0.75之间时候,表现为中等空间自相关性,受到随机因素和结构因素的共同作用;>0.75时,表明空间自相关性较弱,主要受到随机因素(耕作制度、施肥等)的影响。

本研究通过GS+软件拟合了全磷和有效磷的半方差函数模型和相关参数(表6)。根据模型拟合的 R^2 挑选最优的模型,全磷以指数模型拟合效果最好, R^2 为0.843,块金系数为0.918;有效磷则以球状模型拟合效果最优, R^2 为0.899,块金系数为0.928;全磷和有效磷的块金系数均>0.75,都表现为较弱的空间自相关性。这表明海南岛主要农田耕层土壤全磷和有效磷的分布主要受到随机因素

表 6 海南岛大田洋全磷和有效磷半方差函数理论模型及相关参数

Tab. 6 Theoretical model of semi-variance function of Datianyang total phosphorus and available phosphorus in Hainan Island and related parameters

指标 Index	模型 Model	块金常数 NuggetC ₀	基台值 SillC ₀ +C	块金系数 Nugget/sillC ₀ /(C ₀ +C)	决定系数 R ²	变程 Rang/km
全磷 Total phosphorus	线性模型 linear model	0.011	0.014	0.22	0.716	86.15
	球状模型 spherical model	0.000 02	0.013	0.998	0.793	16.7
	指数模型 exponential model	0.001 1	0.013 5	0.918	0.843	21
	高斯模型 Gaussian model	0.001	0.013 4	0.891	0.793	14.38
有效磷 Available phosphorus	线性模型 linear model	0.814	1.012 14	0.196	0.516	88.47
	球状模型 spherical model	0.069	0.958	0.928	0.899	15.1
	指数模型 exponential model	0.142	0.962	0.852	0.893	19.2
	高斯模型 Gaussian model	0.172	0.958	0.82	0.898	12.99

的影响,主要原因可能与磷肥施用量过高和不同的田间管理方式有关。

2.5 海南岛主要农田土壤全磷、有效磷的空间分布 通过 Arcgis 中的地统计分析模块对全磷和有效磷数据进行普通克里格插值分析,因本次数据不符合克里格插值所要求的正态分布,因此采用地统计分析模块中的数据转换功能,对数据进行 BOX-COX 转换后符合正态分布,然后结合半方差函数拟合的最优模型,绘制土壤全磷和有效磷的空间分布图(图 2、图 3)。表 7 数据来源于 Arcgis 中地统计向导的交叉验证结果,其中均方根标准误差接近于 1,平均标准误差和均方根误差趋近于相等,平均误差和标准预测误差越接近于 0,则插值精度越高。本研究中,全磷和有效磷的均方根标准误差(RMSSE)分别为 0.919 和 1.065,均接近 1;两者的均方根误差(RMSE)和平均标准误差(ASE)的值趋近于相等,平均误差(ME)和标准预测误差(MSE)均接近于 0;这表明本次的克里格插值精度较为准确。

根据全国第二次土壤普查的土壤养分分级标准,将插值预测后的全磷进行了区间的划分,详见图 2;土壤有效磷的含量远远高出了全国第二次土壤普查土壤养分分级标准中的一级标准,为了更

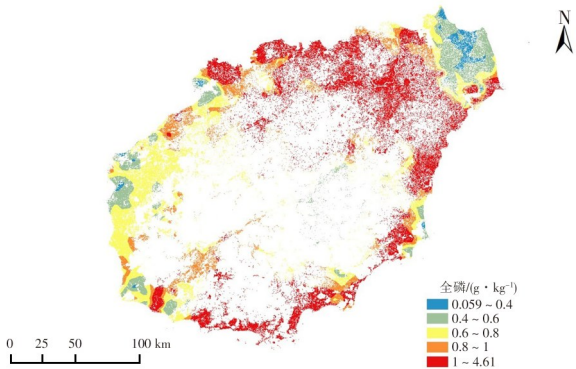


图 2 海南岛耕地土壤全磷空间分布图

Fig. 2 Spatial distribution map of total phosphorus in cultivated soil of Hainan Island

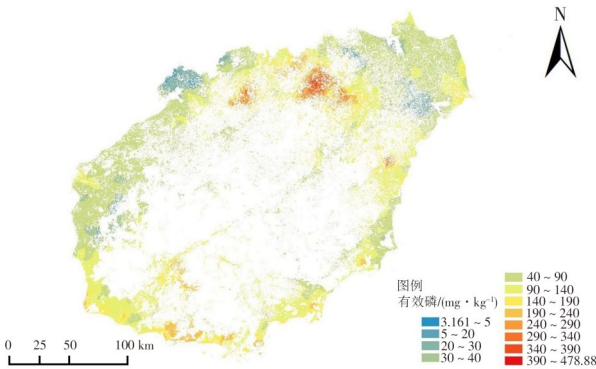


图 3 海南岛耕地土壤有效磷空间分布

Fig. 3 Spatial distribution of available phosphorus in cultivated soil in Hainan Island

准确地体现农田土壤有效磷的分布状况,将高于 $40\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ (一级水平)的有效磷,以每 $50\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 为区间,划分了更多的范围,详见图3。结果表明:海南岛北部和南部地区的土壤全磷含量基本处于一级水平,集中分布在 $0.8\sim 4.61\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 之间;东部和西部地区的土壤全磷含量相对较低,集中分布在 $0.059\sim 0.8\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 之间。海南岛主要农田耕层土壤的有效磷含量整体偏高,北部地区土壤有效磷

含量介于 $3.16\sim 478.88\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 之间,土壤有效磷分布不均衡,其中海口市和澄迈县的土壤有效磷含量最高可达 $400\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 左右;南部地区土壤的有效磷则集中分布在 $90\sim 240\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 之间,东部和西部地区的土壤有效磷含量相对较低,集中分布在 $20\sim 90\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 之间。不同市县的土壤全磷和有效磷含量差异性较大,其原因可能与不同市县农田的生产种植模式和施肥管理有关。

表7 海南岛耕地土壤全磷和有效磷克里格插值精度

Tab. 7 Kriging interpolation precision of total phosphorus and available phosphorus in cultivated soil of Hainan Island

指标 Index	平均误差 ME	均方根误差 RMSE	平均标准误差 ASE	标准预测误差 MSE	均方根标准误差 RMSSE
全磷 Total phosphorus	0.008 8	0.450	0.527	0.003 2	0.919
有效磷 Available phosphorus	-0.487 0	73.786	77.540	-0.016 1	1.065

3 讨 论

磷肥的合理施用可以改善作物的产量及品质,磷肥施入土壤后容易被其中的无定形铁、铝等氧化物吸附固定,土壤中的磷素易出现积累现象^[17]。海南岛土壤多以砖红壤为主,此类土壤高度风化,偏酸性且有机质含量较低,人们普遍认为此类土壤养分含量较低,但经过长时间的人为耕作,土壤有效磷含量出现明显差异。钟萍等^[18]的调查结果表明,海南省东方市的土壤有效磷均值仅为 $23.3\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,各乡镇之间存在较强的变异性;潘孝忠等^[19]对海南省琼中市的土壤有效磷调查均值仅为 $7.4\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,但变异系数高达231%。本次调查发现,海南岛主要农田耕层土壤有效磷含量介于 $3.16\sim 478.88\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 之间,均值为 $106.51\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,变异系数高达91%,土壤有效磷具有较强的变异性,与前人研究结果相似。土壤有效磷含量与前人研究结果相比普遍偏高,部分种植水稻的田块有效磷可达 $400\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 左右,其原因可能与水旱轮作和稻菜轮作有关。赵永鉴等^[20]对海南省澄迈县稻菜轮作和香蕉种植体系的氮磷盈余研究表明,稻菜体系的高磷素盈余几乎全部来自于辣椒季。海南岛主要农田耕层土壤的全磷均值为 $1.02\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,最高可达 $4.61\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$;土壤全磷和有效磷含量过高,积累较为严重,其原因可能与施肥量过大有关。胡云峰等^[21]对红壤旱地的长期施肥研

究表明,磷肥和有机肥的配施会促进土壤全磷和有效磷的积累,尤其是以猪粪为原料的腐熟粪肥对磷素含量的提升效果最为显著。

在本次研究中发现,有效磷与容重和pH呈极显著性正相关,与有机质呈极显著性负相关;容重与有机质为极显著负相关。与前人的研究结果相似^[10,22]。容重大且pH低的土壤对磷具有较强的吸附固定的作用^[23],通过合理增施有机肥增强土壤对磷的吸附能力,提高作物对磷的吸收利用率,是防止农田土壤有效磷含量过高的有效途径之一^[24]。有效磷与田块种植作物之间也存在极显著的相关性,在本次采样中,农户种植高收益作物的田块有效磷含量普遍偏高。例如海南省澄迈县桥头镇以种植甘薯闻名,其土壤有效磷的均值达 $167.52\sim 186.28\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ^[25];洪秀杨等^[26]的研究表明,海南省农业生产中经济作物占比高,养分投入强度大,磷、钾施用过量的问题比较突出。海南岛主要农田耕层土壤有效磷的含量受到人为因素的影响,种植高经济效益作物的田块有效磷含量较高。

不同土地利用类型的土壤磷素含量存在一定差异^[27],本研究中,旱地和水田的全磷和有效磷均值显著高于其他类型(林地、花卉种植地等)。刘旭阳等^[28]的研究结果表明,福州农田土壤全磷含量大小表现为菜地>水稻田>茉莉园,与本研究结果相类似,不同土地利用类型的土壤磷素含量

存在差异的原因可能与人为施肥有关。本研究中,海南岛主要农田耕层土壤全磷和有效磷的块金系数分别为0.918和0.928,表现为较弱的空间自相关性,主要受到随机因素的影响,即不同的生产种植模式和施肥管理等因素;这与贾振宇^[29]等人对土壤有效磷的研究结果一致,DEMAÏ等^[30]的研究同样认为,对于全球土壤磷肥力的高低来说,其中一半来自于人为施肥。

磷是水体富营养化的主要限制性因子之一,以磷为核心的农业面源污染已经上升为我国水体富营养化的主要因子^[30],当土壤的有效磷含量达到某一临界值时,水溶性磷在土壤有效磷中的占比将会增大,农田磷素流失的风险性也将增大,该临界值则为土壤磷的环境阈值^[31]。土壤磷的环境阈值在不同程度上受到气候、温度和土壤性质的影响,前人研究指出,潮土磷的环境阈值为 $24.65 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ^[32],红壤磷的环境阈值为 $36.17 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ^[33],菜地土壤磷的环境阈值集中在 $60 \sim 80 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ^[5],本研究的土壤有效磷含量明显超出了不同土壤磷的环境阈值。海南岛主要农田耕层土壤有效磷含量整体偏高,引发水体污染的风险性较大,通过对比海南省2022年与2010年的统计年鉴^[34],海南省整体施肥量呈现下降趋势,磷肥施用量占比降低,复合肥施用量占比增加,为了减少因磷素积累而来的污染风险性,应减少磷肥的施用或者科学施用磷肥。

海南岛主要农田耕层土壤全磷和有效磷较高,全磷表现为中等程度变异,有效磷为较强程度的变异,土壤有效磷积累较为严重,或将面临较高风险的磷素流失。地统计分析表明,土壤全磷和有效磷的空间自相关性较弱,主要受随机因素影响。克里格插值结果表明,海南主要农田耕层土壤全磷呈现南北高,东西低的分布趋势,土壤有效磷含量则集中在分布 $40 \sim 190 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 之间,最高可达 $400 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 左右。土壤全磷和有效磷含量分布不均,不同作物类型下的土壤有效磷含量存在差异。对于全磷和有效磷含量较高的地区,尤其是种植有较高经济收益作物的地区更应控制磷肥的施用,对于含量较低的地区施肥要做到合理配施,避免土壤磷素的积累现象。

参考文献:

- [1] 吴晓君, 曾子鑫, 郭佩佩, 等. 磷肥用量和石灰对甜玉米产量和磷素吸收利用的影响[J]. 热带作物学报, 2023, 44(1): 133–142.
- [2] WANG Y, CUI Y, WANG K, et al. The agronomic and environmental assessment of soil phosphorus levels for crop production: a meta-analysis[J]. *Agronomy for Sustainable Development*, 2023, 43(2): 35. [LinkOut]
- [3] 张育文, 范子晗, 李顺晋, 等. 基于辣椒产量、磷素累积及土壤磷环境风险的磷肥用量研究[J]. 中国土壤与肥料, 2022(5): 34–42.
- [4] 王瑞, 仲月明, 李慧敏, 等. 高投入菜地土壤磷素环境与农学阈值研究进展[J]. 土壤, 2022, 54(1): 1–8.
- [5] 杨洁, 郑龙, 邵霜霜, 等. 海南省陵水县蔬菜种植区土壤磷素的积累、固定特性及流失风险评估[J]. 生态与农村环境学报, 2020, 36(11): 1453–1459.
- [6] 鲁如坤. 土壤磷素水平和水体环境保护[J]. 磷肥与复肥, 2003, 18(1): 4–8.
- [7] JALALI M, BUSS W, PARVIZNIA F, et al. The status of phosphorus levels in Iranian agricultural soils: a systematic review and meta-analysis[J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2023, 195(7): 842.
- [8] 郭旭东, 傅伯杰, 马克明, 等. 基于GIS和地统计学的土壤养分空间变异特征研究: 以河北省遵化市为例[J]. 应用生态学报, 2000, 11(4): 557–563.
- [9] SONG S, YANG R, CUI X, et al. County-scale spatial distribution of soil nutrients and driving factors in semiarid Loess Plateau farmland, China[J]. *Agronomy*, 2023, 13(10): 2589.
- [10] 范声浓, 李华东, 王烁衡, 等. 基于IDW和因子分析的海南省火龙果园土壤养分空间分布预测[J]. 西南农业学报, 2023, 36(3): 602–611.
- [11] 方圆, 张冬明. 海口市耕地土壤养分调查与评价[J]. 热带农业科学, 2020, 40(9): 20–23.
- [12] 吴美荣, 陈歆. 基于ArcGIS的文昌市耕地土壤养分空间分布预测研究[J]. 热带农业科学, 2020, 40(12): 80–86.
- [13] 全国土壤普查办公室. 中国土壤[M]. 北京: 中国农业出版社, 1998.
- [14] 孙英君, 王劲峰, 柏延臣. 地统计学方法进展研究[J]. 地球科学进展, 2004, 19(2): 268–274.
- [15] 郭军玲. 基于GIS的不同尺度下农田土壤养分空间变异特征研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2010.
- [16] YANG J, HUANG X. The 30 m annual land cover dataset and its dynamics in China from 1990 to 2019[J]. *Earth System Science Data*, 2021, 13(8): 3907–3925.
- [17] 杨娇, 信秀丽, 钟新月, 等. 长期不同施肥对潮土磷素吸附特征的影响[J]. 土壤学报, 2023, 60(4): 1047–1057.
- [18] 钟萍, 王登峰, 魏志远, 等. 我国热区农田土壤养分时空分布研究: 以海南省东方市为例[J]. 南方农业学报, 2014, 45(1): 58–62.
- [19] 潘孝忠, 谭丽霞, 卓免福, 等. 海南琼中热带农田土壤养分分布特征研究[J]. 云南农业大学学报(自然科学), 2016, 31(6): 1149–1154.
- [20] 赵永鉴, 张博飞, 张翀, 等. 海南典型稻菜轮作区和香

- 蕉园氮磷盈余及土壤硝态氮累积[J]. 中国农业科学, 2023, 56(15): 2954–2965.
- [21] 胡云峰, 王擎运, 屠人凤, 等. 长期施肥下旱地红壤剖面磷素的形态变化与累积特征[J]. 华中农业大学学报(自然科学版), 2022, 41(2): 115–123.
- [22] 李忠芳, 唐政, 娄翼来, 等. 我国南方桂东地区农田土壤养分特征及对有机碳驱动分析[J]. 中国土壤与肥料, 2015(3): 6–11.
- [23] 洪欠欠, 颜晓, 魏宗强, 等. 长期施肥与土壤性质对水稻土磷吸附的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2018(3): 61–66.
- [24] 颜晓, 卢志红, 魏宗强, 等. 几种典型酸性旱地土壤磷吸附的关键影响因素[J]. 中国土壤与肥料, 2019(3): 1–7.
- [25] 刘健, 娄运生, 任丽轩, 等. 海南澄迈甘薯营养品质与土壤养分相关性研究[J]. 西南农业学报, 2021, 34(11): 2398–2403.
- [26] 洪秀杨, 钟于秀, 李伟芳, 等. 海南农田养分平衡状况及环境风险评价[J]. 植物营养与肥料学报, 2022, 28(11): 2070–2081.
- [27] 曾婷, 侯萌, 王耀, 等. 不同土地利用类型对土壤纤维素酶活性及肥力因子的影响[J]. 中国农业科技导报, 2024, 26(1): 193–200.
- [28] 刘旭阳, 陈晓旋, 陈优阳, 等. 福州不同农田土地利用类型土壤碳氮磷生态化学计量学特征[J]. 水土保持学报, 2019, 33(6): 348–355.
- [29] 贾振宇, 张俊华, 丁圣彦, 等. 基于GIS和地统计学的黄泛区土壤磷空间变异: 以周口为例[J]. 应用生态学报, 2016, 27(4): 1211–1220.
- [30] DEMAY J, RINGEVAL B, PELLERIN S, et al. Half of global agricultural soil phosphorus fertility derived from anthropogenic sources[J]. Nature Geoscience, 2023, 16: 69–74. [LinkOut]
- [31] 刘娟, 包立, 张乃明, 等. 我国4种土壤磷素淋溶流失特征[J]. 水土保持学报, 2018, 32(5): 64–70.
- [32] 严正娟. 施用粪肥对设施菜田土壤磷素形态与移动性的影响[D]. 北京: 中国农业大学, 2015.
- [33] 刘娟, 张乃明, 张淑香. 潮土磷素累积流失风险及环境阈值[J]. 农业工程学报, 2020, 36(20): 8–16.
- [34] 刘娟, 张乃明, 徐红娇, 等. 不同土地利用方式下红壤磷素径流流失特征[J]. 水土保持学报, 2020, 34(5): 103–110.
- [35] 海南省统计局. 海南统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2021.

Spatial distribution characteristics of soil phosphorus in the plow layer soil of the main farmlands in Hainan Island

ZHANG Shanheng¹, WANG Wenbin^{2,3}, ZHANG Yongfa^{2,3}, LUO Xuehua^{2,3}, XUE Xinxin^{2,3}, ZHAO Chunmei^{2,3}, REN Changqi^{2,3}, WANG Yu^{2,3}, WU Xiaoshuang^{2,3}, GENG Jianmei¹

(1. Hainan University, Haikou, Hainan 570228; 2. Rubber Research Institute, CATAS, Haikou, Hainan 571101; 3. Soil and Fertilizer Research Center, Chinese Academy of Tropical Agricultural Sciences, Haikou, Hainan 571101, China)

Abstract: Investigating the spatial distribution characteristics of phosphorus in farmland plow layer soil can help understand the accumulation status of soil phosphorus, providing a basis for the judicial application of phosphorus fertilizer in farmland. From the main farmlands in Hainan Island 2 386 soil samples were collected from the plow layer (0–20 cm) and their soil indexes such as total phosphorus content, available phosphorus content, organic matter content, etc., in the soil were determined. The spatial autocorrelation of the total phosphorus and available phosphorus in the soil was analyzed by using geostatistical methods, and ordinary kriging interpolation was used to predict the spatial distribution of total phosphorus and available phosphorus in the plow layer soil of the main farmlands in Hainan Island. The results indicate that the plow layer soil in the main farmlands of Hainan Island has relatively high and highly variable contents of total phosphorus and available phosphorus. The range of total phosphorus content in the soil is between 0.06 to 4.61 g·kg⁻¹, with 40% of the soil samples exceeding the first level (> 1 g·kg⁻¹), with a mean of 1.02 g·kg⁻¹ and a coefficient of variation of 64%; the range of available phosphorus content in the soil is between 3.16 to 478.88 mg·kg⁻¹, with 72% of the soil samples exceeding the first level (> 40 mg·kg⁻¹), with a mean of 106.51 mg·kg⁻¹ and a high coefficient of

variation of 91%. The Nugget/Sill ratios of total phosphorus content and available phosphorus content are 0.918 and 0.928, respectively, indicating weak spatial autocorrelation mainly influenced by random factors. The kriging interpolation prediction map shows that the plow layer soil has higher total phosphorus content in the soil, mainly between 0.8 to 4.61 g·kg⁻¹ in the north and south of Hainan Island, and relatively lower total phosphorus content, mainly ranging from 0.4 to 0.8 g·kg⁻¹ in the east and west. The overall available phosphorus content in the soil is relatively high, with the available phosphorus content in the north ranging from 3.16 to 478.88 mg·kg⁻¹, exhibiting uneven distribution, with the highest available phosphorus content reaching around 400 mg·kg⁻¹ in Haikou City and Chengmai County. In the south the available phosphorus content in the soil is concentrated in between 90 to 240 mg·kg⁻¹, while in the east and west it is relatively lower, concentrated in between 20 to 90 mg·kg⁻¹. Overall, the contents of total phosphorus and available phosphorus in the plow layer soil of the main farmlands in Hainan Island are at a relatively high level, highly influenced by fertilizer application. The water bodies surrounding the main farmlands face significant pollution risks, indicating the need to control the application of phosphorus fertilizers in agricultural production.

Keywords: Geographic Information System; available phosphorus; geostatistical analysis; spatial distribution; land use type

(责任编辑:潘学峰)