农田表层土壤养分空间变异特性研究

王　婕[1,2]，牛文全[1,3※]，张文倩[1,2]，李国春[3]，孙　军[1,2]，王彦邦[1,2]

（1. 西北农林科技大学旱区农业水土工程教育部重点实验室，杨凌 712100；
2. 西北农林科技大学水利与建筑工程学院，杨凌 712100；　3. 中国科学院水利部水土保持研究所，杨凌 712100）

摘　要：为给田间养分监测设施布设方法提供依据，在陕西杨凌选取 2 块农田，采用 12 m×12 m 嵌套 6 m×6 m 的采样方法，采集表层土壤（0～20 cm）养分数据，运用经典统计、地统计学结合 Kriging 插值方法，分析农田土壤养分空间变异特征。结果表明：冬小麦抽穗期与成熟期农田表层土壤全氮（TN）变异系数<10%，为弱变异，土壤有机质（SOM）、有效磷（AP）变异系数介于 10%与 100%之间，为中等变异，有效钾（AK）和铵态氮（NH_4^+-N）变异系数>100%，为强变异，成熟期硝态氮（NO_3^--N）由强变异转为中等变异。土壤养分最优半方差模型为球状模型，作物不同生育阶段，土壤养分空间相关性存在一定的差异，土壤 SOM、TN 块金系数<25%，空间相关性强烈，以结构性因素为主导；冬小麦抽穗期速效态养分块金系数介于 25%与 75%之间，空间相关性中等，随机性因素主导，成熟期<25%，空间相关性增强。采样密度由 6 m×6 m 变为 12 m×12 m 时，变异程度保持不变，土壤养分空间变异系数差值在 0.04%～59.48%范围内，成熟期 2 号样地的 AK 除外，块金系数差值在 0.065%～34.177%范围内，2 种采样间距获得的土壤养分空间变异特征基本一致，建议选用 12 m×12 m 网格。

关键词：土壤；养分；空间变异；地统计学；采样网格间距
doi：10.11975/j.issn.1002-6819.2020.15.005
中图分类号：S274　　**文献标志码**：A　　**文章编号**：1002-6819(2020)-15-0037-10

王婕，牛文全，张文倩，等. 农田表层土壤养分空间变异特性研究[J]. 农业工程学报，2020，36(15)：37-46.　doi：10.11975/j.issn.1002-6819.2020.15.005　http://www.tcsae.org
Wang Jie, Niu Wenquan, Zhang Wenqian, et al. Spatial variability of soil nutrients in topsoil of cultivated land[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2020, 36(15): 37-46. (in Chinese with English abstract)　doi：10.11975/j.issn.1002-6819.2020.15.005　http://www.tcsae.org

0　引　言

精准农业是未来发展趋势，土壤特性的空间变异性是精准农业的基础，是促进田间信息采集系统可持续发展的理论支撑[1-2]。土壤空间变异，即土壤随空间位置、地形差异等变化而产生相应的特性变化[3]，由于受到自然因素和人为因素的作用[4]，这种变异是广泛存在的。土壤养分作为表征耕地质量和土壤肥力的重要指标[5]，是田间信息采集的重中之重。土壤养分空间变异性的研究是探讨土壤养分与影响因子关系的有效方法[6]。因此，深入研究土壤养分的空间变异规律及产生原因，为实现田间土壤的合理布点采样，快速、经济、准确的测定土壤养分，进行有效的养分管理具有重要的意义[7]。

随着精准农业的兴起，国内外学者针对不同地区的土壤养分的空间变异特性做了大量的研究。其研究尺度主要集中在城区、半干旱区、小流域、平原、丘陵和田间[8-12]；土地类型包括旱地、湿地、园地、煤矿区[13-15]等；研究内容有植被类型、秸秆覆盖、土壤水分、尺度、养分流失、土壤性质[16-21]等。在此基础上，基于地统计学等方法研究土壤养分的空间分布特征及预测[22]，同时对土壤肥力空间变异及其评价进行探讨[23-24]。土壤养分含量和分布特征是由结构性变异（如地形、气候、母质、水文、土壤类型等）和随机性变异（灌溉、施肥、种植制度、管理水平等）共同作用的结果[25]。此外，还存在由人为因素引起的尺度效应，即采样尺度、采样间距也显著影响土壤养分的分布结果。近年来，专家学者的研究集中于大尺度（城区、乡镇等）的空间变异性，土壤养分在田间范围内的研究较少。鉴于中国耕地所面临的严峻形势以及田间精准农业[1]全面推广的现状，亟需针对小尺度耕地土壤养分的空间变异进行深入研究。土壤养分监测点的密度过小直接降低土壤养分的差异性[26]，监测点密度过大则加重采样工作以及经济负担，因此选取适宜的采样间距十分必要。

本研究选择陕西省杨凌农业高新技术产业示范区耕地为研究区，采集土壤表层（0～20 cm），通过测定土壤有机质（SOM）、有效磷（AP）、速效钾（AK）、全氮（TN）、硝态氮（NO_3^--N）及铵态氮（NH_4^+-N）等指标，利用经典统计学、地统计学方法结合 Kriging 插值，通过研究不同田块表层土壤养分的空间变异特征及其原

收稿日期：2020-05-15　　修订日期：2020-06-29
基金项目：宁夏回族自治区重点研发计划（重点）项目（2018BBF02006）；国家自然科学基金项目（51679205）
作者简介：王婕，主要从事农业水土与节水灌溉技术研究。
Email：wjxn@nwafu.edu.cn
※通信作者：牛文全，研究员，博士生导师，主要从事水土资源高效利用与节水灌溉研究。Email：nwq@nwafu.edu.cn

因，结合生产实践进一步明确表征土壤养分变异度的合理采样方法，为田间养分监测设施布设以及农业生产精细化提供重要的科学理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

试验地位于陕西省杨凌农业高新技术产业示范区西北农林科技大学试验基地曹新庄农场（108°05′E、34°18′N），耕地面积约 53.36 km^2，该区属于黄土台塬地貌，坡地和塬地相间，土壤类型为塿土。海拔 521 m，地处暖温带半湿润季风气候，年平均气温 13 ℃，年均日照时间约 2 163.8 h，全年无霜期 210 d，多年平均降雨量 623 mm，多集中在 7－10 月，年均蒸发量 1 500 mm。在农场选取 2 个区域，1 号样地为新开垦荒地，2 号样地多年耕种农田，采用小麦-玉米轮作种植。土壤质地（国际制）：1 号样地黏粒含量（<0.002 mm）占 32.91%，粉粒含量（0.002～0.02 mm）占 40.11%，砂砾（0.02～2 mm）占 26.98%，壤质黏土，土壤容重 1.26g/cm^3；2 号样地黏粒含量（<0.002 mm）占 30.48%，粉粒含量（0.002～0.02 mm）占 34.98%，砂砾（0.02～2 mm）占 34.55%，壤质黏土，土壤容重 1.23 g/cm^3。

1.2 样品采集

本试验采用网格法，将样地划分成大网格 12 m×12 m 内嵌套小网格 6 m×6 m 的样方。在冬小麦的抽穗期、成熟期，用土钻（土钻高 20 cm，内径 4 cm，约 250 cm^3）以采样点中心为圆心，1 m 为半径，以 S 型或者锯齿型采集土壤表层（0～20 cm）土样。采样过程遵循等量、随机、多点的原则，在采样区域内采集 3 个点位的土样并充分混合，采用四分法提取样本，除去 2 号样地随机分布在井房、道路的 6 个样点，实际为 84、66 个点位，每次采集 150 个土样。样本经自然风干后研磨过筛用于测定养分指标。1 号样地和 2 号样地冬小麦播种前，底肥均以磷酸二铵 25 kg、尿素 25 kg 一次性施入，2 号样地另外施入了 25 kg 油渣。如表 1 所示。

表 1 试验布设表

Table 1 Test layout table

样地 Test field	试验区域 Test area/(m×m)	网格大小 Grid size/(m×m)	采集深度 Sampling depth/cm	采集点数 Sampling points	采集次数 Sampling number
1	66×36	6×6	20	84	2
		12×12	20	24	2
2	48×42	6×6	20	66	2
		12×12	20	19	2

1.3 指标测定

试验采集的土壤养分包括：土壤有机质（SOM）、有效磷（AP）、速效钾（AK）、全氮（TN）、硝态氮（NO_3^--N）、铵态氮（NH_4^+-N），指标测定参照《土壤农化分析》。采集土壤样品进行风干、研磨，SOM、AP、AK、TN、NO_3^--N 及 NH_4^+-N 分别过 0.25、1、1、0.25、2、2 mm 的筛。采用重铬酸钾外加热法测定土壤有机质，0.5 mol/L 碳酸氢钠浸提—AA3 型连续流动分析仪测定土壤有效磷，1 mol/L 乙酸铵浸提—火焰光度计法测定土壤速效钾，凯氏消煮法—AA3 型连续流动分析仪测定土壤全氮，1 mol/L 氯化钾浸提—AA3 型连续流动分析仪测定土壤速效氮，MS2000 型激光分析粒度仪测定土壤颗粒组成。

1.4 数据处理与分析

采用拉依达（Pauta）检验法[5]，剔除异常值，将异常值分别用正常最大值和最小值代替。利用 SPSS22.0 软件进行描述性统计分析和正态分布检验；根据 Cochran 最佳采样数量计算公式[26]，确定田间土壤各养分指标的合理采样数（t 分别为 1.989、1.997）；GS^+软件（版本 9.0，美国 Gamma Design Software）进行土壤养分空间半变异函数分析，调节不同模型参数（决定系数 R^2）进行模型拟合；利用 ArcGIS10.5 中的 Geostatistics analysis 模块进行 Kriging 插值和交叉验证；Sufer 软件（版本 13.0，美国 Golden Software）进行土壤养分的空间分布等值线图绘制和空间变异特征分析。

2 结果与分析

2.1 描述性统计分析

农田土壤 SOM、AP、AK、TN、NO_3^--N、NH_4^+-N 等统计结果如表 2。

抽穗期 1 号样地 SOM、AP、AK、TN、NO_3^--N、NH_4^+-N 的标准差分别为 11.66、0.02、0.03、0.32、0.07、0.05 g/kg。6 种主要养分指标变异系数介于 1.32%～240.13%之间。变异系数越大，说明它在空间上分布不均匀，受到外界影响程度越高。AK 和 NO_3^--N、NH_4^+-N 变异系数达到强变异，TN 为弱变异，SOM、AP 为中等变异。2 号样地的 SOM、AP、AK、TN、NO_3^--N、NH_4^+-N 质量分数分别为 21.96、0.04、0.28、1.13、0.06、0.08 g/kg。6 种指标的离散程度趋势和 1 号样地基本保持一致。NO_3^--N 变异强度最大（250.45%），其余养分变异强度从大到小依次 AK(170.40%)、NH_4^+-N (144.93%)、AP(48.58%)、SOM(42.08%)、TN(1.35%)。

成熟期，1 号样地 SOM、AP、AK、TN、NO_3^--N、NH_4^+-N 质量分数均值分别为 19.89、0.04、0.31、1.07、0.01、0.06 g/kg；2 号样地 SOM、AP、AK、TN、NO_3^--N、NH_4^+-N 质量分数均值分别为 14.38、0.03、0.41、1.48、0.01、0.04 g/kg。从抽穗期到成熟期，土壤养分除 2 号样地 AK 外（增施油渣），均有不同程度的减少。1 号样地和 2 号样地的 TN 的变异系数分别为 1.45%、1.34%，呈弱变异；土壤 SOM 变异系数分别为 30.33%、24.21%，AP 的变异系数分别为 57.36%、59.04%，呈中等变异；土壤 AK 及 NH_4^+-N 的变异系数呈强变异，NO_3^--N 变异系数分别为 22.68%、22.16%，变异程度由抽穗期的强变异减弱到中等变异。

从变异系数来看，2 块样地的速效态养分 AK 和 NO_3^--N、NH_4^+-N 变化显著，其不稳定性对农田表层土壤影响较大，进一步影响到作物。

表 2　农田土壤养分统计特征

Table 2　Descriptive statistical characteristics of soil nutrients of cultivated land

采集时间 Sampling time	样地 Test field	指标 Index	6 m×6 m 均值 Average/(g·kg^{-1})	6 m×6 m 标准差 SD/(g·kg^{-1})	6 m×6 m 变异系数 CV/%	6 m×6 m 分布类型 Distribution type	12 m×12 m 均值 Average/(g·kg^{-1})	12 m×12 m 标准差 SD/(g·kg^{-1})	12 m×12 m 变异系数 CV/%	12 m×12 m 分布类型 Distribution type
抽穗期 Heading stage	1	SOM	20.35	11.66	49.95	Box-Cox 正态	21.91	10.65	40.65	正态
		AP	0.04	0.02	64.00	正态	0.04	0.01	51.76	正态
		AK	0.32	0.03	102.70	正态	0.32	0.03	101.10	正态
		TN	1.15	0.32	1.32	Box-Cox 正态	1.14	0.30	1.28	正态
		NO_3^--N	0.08	0.07	240.13	对数正态	0.08	0.09	282.60	对数正态
		NH_4^+-N	0.09	0.05	210.86	正态	0.10	0.07	270.34	正态
	2	SOM	21.96	11.46	42.08	对数正态	20.93	10.67	41.45	正态
		AP	0.04	0.01	48.58	正态	0.04	0.01	43.34	正态
		AK	0.28	0.05	170.40	正态	0.28	0.06	147.70	正态
		TN	1.13	0.29	1.35	对数正态	1.16	0.32	1.20	正态
		NO_3^--N	0.06	0.07	250.45	Box-Cox 正态	0.05	0.08	264.43	Box-Cox 正态
		NH_4^+-N	0.08	0.03	144.93	正态	0.07	0.03	126.83	正态
成熟期 Ripening stage	1	SOM	19.89	9.03	30.33	正态	20.20	11.39	47.41	正态
		AP	0.04	0.01	57.36	正态	0.04	0.01	44.36	正态
		AK	0.31	0.19	862.20	正态	0.31	0.22	831.70	正态
		TN	1.07	0.30	1.45	正态	1.15	0.31	1.39	正态
		NO_3^--N	0.01	0.01	22.68	对数正态	0.01	0.01	22.32	正态
		NH_4^+-N	0.06	0.03	106.41	正态	0.06	0.03	99.24	正态
	2	SOM	14.38	4.97	24.21	正态	14.51	3.21	13.63	正态
		AP	0.03	0.01	59.04	正态	0.03	0.02	50.68	正态
		AK	0.41	0.17	771.50	对数正态	0.39	0.11	373.50	正态
		TN	1.48	0.29	1.34	对数正态	1.45	0.20	0.68	正态
		NO_3^--N	0.01	0.01	22.16	对数正态	0.01	0.01	13.70	正态
		NH_4^+-N	0.04	0.03	105.17	正态	0.04	0.03	103.30	正态

将采样网格 12 m×12 m 和 6 m×6 m 的统计结果进行对比。抽穗期和成熟期 2 块样地各指标平均值差值基本为零；变异系数差值在 0.04%～59.48%范围内，成熟期 2 号样地的 AK 除外（398%），AK、NO_3^--N、NH_4^+-N 变异系数差值较大，特别是成熟期 2 号样地的 AK 变异系数骤减。成熟期空间分布较抽穗期均匀。

扩大网格后土壤养分中的 SOM、AP、TN 的平均值、标准差、变异系数变化较小，对 AK、NO_3^--N、NH_4^+-N 的影响较大。参照全国第二次土壤普查分级标准，对抽穗期样地各养分含量均值进行等级划分，见表 3。

表 3　土壤养分含量与分级

Table 3　Classification of soil nutrient content

采集时间 Sampling time	样地 Test field	指标 Index	6 m×6 m 均值 Average/(g·kg^{-1})	6 m×6 m 等级 Class	12 m×12 m 均值 Average/(g·kg^{-1})	12 m×12 m 等级 Class
抽穗期 Heading stage	1	SOM	20.35	3	21.91	3
		AP	0.04	1	0.04	1
		AK	0.32	1	0.32	1
		TN	1.15	3	1.14	3
	2	SOM	21.96	3	20.93	3
		AP	0.036	2	0.036	2
		AK	0.28	1	0.28	1
		TN	1.13	3	1.16	3
成熟期 Ripening stage	1	SOM	19.89	4	20.2	3
		AP	0.039	2	0.038	2
		AK	0.31	1	0.31	1
		TN	1.07	3	1.15	3
	2	SOM	14.38	4	14.51	4
		AP	0.03	2	0.03	3
		AK	0.41	1	0.39	1
		TN	1.48	3	1.45	3

注：等级 1 表示很丰富，2 表示丰富，3 表示中等，4 表示缺乏，5 表示很缺乏，6 表示极缺乏。

Note: Class 1 means very rich, 2 means rich, 3 means medium, 4 means lack, 5 means very lack, 6 means extremely lack.

扩大网格后的 SOM、AK、TN 养分含量等级均未发生变化，2 号样地的 AP 含量等级略低于 1 号样地，但仍处于养分含量等级为丰，速效态养分其迁移性强和稳定性较差的特性，使得变异度在一定程度上变动，但总体依旧处于同一等级。由于作物的吸收利用，成熟期 SOM、AP 养分含量等级降级，AK、TN 保持不变，扩大网格间距后养分含量等级未发生变化，因此 12 m×12 m 网格间距可取。

此外，抽穗期两块样地的 AP、AK 和 NH_4^+-N 服从正态分布，对 NO_3^--N 进行对数转换后满足正态分布。SOM 与 TN 通过 Box-Cox 转换，经 K-S 检验后系数均为 0.2，也符合正态分布。2 号样地 SOM 与 TN 经对数转换后符合正态分布，NO_3^--N 经过 Box-Cox 转换也符合正态分布。成熟期 1 号样地的 NO_3^--N，2 号样地的 AK、TN 以及 NO_3^--N 经对数转换后符合正态分布，其余各指标均服从正态分布，可运用地统计学软件进行半变异分析。

2.2　合理采样数分析

为用有限观测值估计各参数均值，保证足够的可靠性和精度，土壤空间变异性的研究必须确定合理取样数[27]。根据 Cochran 最佳采样数量计算公式，计算抽穗期土壤各养分指标在一定置信水平（95%）和相对误差（5%、10%、15%）要求下的研究区合理采样数（表 4）。结果表明，土壤各种特性所需采样点不一；在相同的置信水平下，合理采样数 n 随相对误差的增大而减小；在 95%置信水平，相对误差范围 5%内，1 号样地和 2 号样地的最佳采样数为 77、64，同理，成熟期两块样地的最佳采样数为 73、62。可使土壤中 6 种养分指标的分析精度较高，从而达到较好的效果，即本研究土壤采样数合理。

表 4 95%置信水平下土壤养分合理采样数

Table 4 Reasonable sampling number of soil nutrients under the 95% confidence level

采集时间 Sampling time	样地 Test field	指标 Index	不同相对误差下合理采样数 Reasonable sampling number under different relative errors		
			5%	10%	15%
抽穗期 Heading stage	1	SOM	72	51	34
		AP	51	23	12
		AK	10	3	1
		TN	49	22	12
		NO_3^--N	77	63	48
		NH_4^+-N	70	47	31
	2	SOM	57	41	28
		AP	47	26	14
		AK	27	10	5
		TN	41	19	10
		NO_3^--N	64	59	52
		NH_4^+-N	50	29	17
成熟期 Ripening stage	1	SOM	67	41	25
		AP	49	22	11
		AK	73	53	37
		TN	51	23	12
		NO_3^--N	66	40	24
		NH_4^+-N	65	39	23
	2	SOM	49	28	16
		AP	55	37	24
		AK	53	33	20
		TN	32	12	6
		NO_3^--N	50	29	17
		NH_4^+-N	62	52	40

2.3 半方差分析

土壤养分的半方差函数参数模拟结果见表 5。抽穗期 1 号样地的 NH_4^+-N 最优半方差函数为指数模型，其余各养分指标均为球状模型。各养分的块金值都大于零（1 号样地的 TN 块金值为 0.000 1），说明采样过程中人为因素引起的随机变异不能忽视。6 种养分的基台值变化范围为 0.097～5138 之间，从大到小依次为 NO_3^--N、NH_4^+-N、AK、AP、SOM、TN。SOM、AK、TN、NO_3^--N 的块金系数小于 25%，说明变量具有强烈的空间相关性，空间变异主要来自结构性因素；而 AP（36.591%）、NH_4^+-N（49.980%）具有中等的空间相关性，结构性和随机性变异二者共同作用。AP 的变程（59.45 m）最大，NH_4^+-N（41.69 m）次之，表明两者均在较大范围内存在空间自相关性。

抽穗期 2 号样地的各养分指标最优半方差函数均为球状模型。从基台值来看，结构性因素引起的变异度从大到小排序为 TN、AP、SOM、NH_4^+-N、AK、NO_3^--N。AK 和 NO_3^--N 的块金系数分别为 39.555%、28.393%，具有中等的空间相关性，其余各养分指标块金系数均小于 25%，具有强烈的空间相关性。各指标的变程由小到大依次是 NH_4^+-N、AP、TN、AK、NO_3^--N、SOM。

冬小麦成熟期，1 号样地 SOM、AP、AK、TN、NO_3^--N、NH_4^+-N 各指标块金系数分别为 0.091%、0.184%、0.277%、3.138%、1.502%、3.536%；2 号样地各指标块金系数分别为 8.346%、1.702%、1.159%、1.382%、0.155%、0.133%。从抽穗初期到成熟期块金系数显著减小，均小于 25%，秋季作物收获后土壤养分含量和形态相对稳定，随机性因素的影响作用剧减。说明成熟期后（秋季作物播种前），土壤养分空间变异度总体呈降低趋势，随机性变异（灌溉、施肥、种植制度、管理水平等）作用减弱。

2 样地的空间插值模型基本趋于球状模型，养分指标 SOM、TN 的变异度较小，主要受以结构性因素为主导的影响；而速效态养分 AP、AK、NO_3^--N、NH_4^+-N 更倾向于随机性因素的作用。变程均大于采样间距 6m，故在该值内的区域化变量均存在空间自相关性。

表 5 土壤养分的最优半方差函数模型及参数

Table 5 Optimal semi-variance function model and parameters of soil nutrients

采集时间 Sampling time	样地 Test field	指标 Index	6 m×6 m					12 m×12 m				
			块金值 Nugget C_0	基台值 Sill (C_0+C)	C_0/(C_0+C)/%	变程 Range/m	R^2	块金值 Nugget C_0	基台值 Sill (C_0+C)	C_0/(C_0+C)/%	变程 Range/m	R^2
抽穗期 Heading stage	1	SOM	0.100	155.500	0.064	20.51	0.953	3.80	116.00	3.276	19.39	0.745
		AP	68.900	188.300	36.591	59.45	0.990	67.80	175.90	38.545	40.23	1.000
		AK	5.000	661.700	0.756	11.97	0.909	47.00	1017.00	4.621	21.34	0.647
		TN	0.000	0.097	0.103	7.16	0.352	0.00	0.08	2.736	18.84	0.559
		NO_3^--N	700.000	5 138.000	13.624	18.21	0.899	670.00	8 470.00	7.910	22.19	0.832
		NH_4^+-N	1 276.000	2 553.000	49.980	41.69	0.641	1910.00	9 930.00	19.235	91.00	0.858
	2	SOM	13.000	218.800	5.941	67.81	0.975	0.10	201.10	0.050	70.63	0.982
		AP	2.800	125.300	2.235	11.52	0.542	10.30	131.50	7.833	21.19	0.691
		AK	977.000	2470.000	39.555	25.72	0.983	166.00	3 087.00	5.377	22.49	0.558
		TN	0.014	0.099	14.503	11.77	0.899	0.00	0.10	0.971	14.18	0.965
		NO_3^--N	1 860.000	6 551.000	28.393	33.54	0.976	310.00	5949.00	5.211	14.18	0.508
		NH_4^+-N	9.000	939.000	0.958	7.16	0.443	33.00	1 151.00	2.867	14.18	0.546
成熟期 Ripening stage	1	SOM	0.100	110.400	0.091	37.33	0.998	17.40	147.70	11.781	25.39	0.342
		AP	0.200	108.900	0.184	11.41	0.674	5.60	127.20	4.403	21.06	1.000
		AK	100.000	36 050.000	0.277	11.16	0.585	100.00	47 140.00	0.212	14.19	0.484
		TN	0.003	0.096	3.138	12.68	0.949	0.00	0.10	1.471	14.19	0.800
		NO_3^--N	0.500	33.300	1.502	8.66	0.431	2.80	37.65	7.437	19.50	0.371
		NH_4^+-N	23.000	650.400	3.536	7.16	0.643	24.00	798.20	3.007	19.30	0.696
	2	SOM	2.250	26.960	8.346	10.05	0.330	2.24	13.39	16.729	39.91	1.000
		AP	2.700	158.600	1.702	11.00	0.544	18.00	446.90	4.028	75.72	0.902
		AK	330.000	28 470.000	1.159	7.16	0.350	560.00	11 370.00	4.925	21.63	0.978
		TN	0.001	0.080	1.382	10.65	0.369	0.00	0.04	6.988	24.83	0.350
		NO_3^--N	0.030	19.310	0.155	9.48	0.523	1.50	34.00	4.412	87.47	0.865
		NH_4^+-N	1.000	750.200	0.133	8.81	0.665	20.00	1 002.00	1.996	17.94	0.361

注：抽穗期 1 号样地 6m×6m 网格下的 NH_4^+-N 为指数模型，各指标理论模型均为球状模型。

Note: The NH_4^+-N under the 6m×6m grid of the test field 1 at the heading stages is an exponential model, and the theoretical models of each index are spherical models.

2 种采样间距，对比土壤养分最优半方差函数结果。1 号样地的 NH_4^+-N 的理论模型转为球状模型，土壤养分 SOM、AK、TN、NO_3^--N 等仍具有强烈空间相关性，AP 依旧具有中等空间相关性，采样间距增大但随机性并未增强，NH_4^+-N 块金系数减小，具有强烈空间相关性，除 AP 外变程均增大。2 号样地减小采样密度后，各养分指标的理论模型保持不变，SOM、AP、TN、NH_4^+-N 的块金系数仍小于 25%，变程增大；而 AK、NO_3^--N 的块金系数减小，空间相关性剧增，结构性因素的影响增加，空间自相关性的最大距离减小。成熟期土壤各养分指标趋于稳定，扩大采样间距后，保持最优模型为球状模型，块金系数<25%，空间相关性强烈。两个时期的块金系数差值在 0.065%～34.177%范围内。

扩大采样间距后，2 块样地的土壤养分半变异函数理论模型均为球状模型，SOM、TN 的块金系数和变程等参数未发生较大变化，采样网格间距对具有中等空间相关性的速效态养分作用较明显。综上，12 m×12 m 的网格间距可取。

2.4　空间分布等值线图分析

Kriging 插值的准确度需要通过交叉验证进行评价，平均预测误差（ME）越接近 0，越满足预测的无偏性；标准化均方根误差（RMSSE）越接近 1，越满足预测标准误差是准确的[28]。对抽穗期土壤养分各指标含量进行克里格的交叉验证，结果表明（表 6），各养分指标的 ME 均趋于 0，速效态养分的预测误差略大于其他指标，RMSSE 也接近于 1，说明精度较高。因此，Kriging 插值可较为准确的反映土壤养分分布的空间状况，是可信的。

表 6　土壤养分含量空间插值交叉验证结果

Table 6　Cross-validation results of spatial estimation of soil nutrients

采集时间 Sampling time	样地 Test field	平均预测误差 Mean forecast error						标准化均方根误差 Standardized root mean square error					
		SOM	AP	AK	TN	NO_3^--N	NH_4^+-N	SOM	AP	AK	TN	NO_3^--N	NH_4^+-N
抽穗期 Heading stage	1	0.041	0.091	-0.078	0.003	0.225	-0.361	0.975	1.068	1.044	1.103	0.954	1.099
	2	0.019	0.169	-0.185	-0.005	0.154	0.168	1.024	1.105	0.977	1.022	0.952	1.103
成熟期 Ripening stage	1	-0.088	0.123	0.128	-0.002	-0.022	0.064	0.969	1.045	1.071	1.000	1.067	1.000
	2	0.054	0.195	0.177	0.004	-0.028	-0.001	1.008	1.116	1.085	1.096	1.047	1.094

运用 Sufer13.0 软件绘制抽穗期土壤养分空间分布等值线图，分别对各养分指标进行空间结构分析，如图 1 和图 2 所示。

从图 1 可以看出，抽穗期 1 号样地的 SOM 含量分布由北向南先减小再增大，变化范围较大，高低错落，低值区位于地块中心。AP 存在 2 个高值区，由北向南呈现减小趋势，低值区尤其集中在地块中心偏东南部的位置。AK 含量整体偏高，变化范围不大，分布相对均匀，整体由中心向四周呈降低趋势。NO_3^- -N 的养分含量高值区集中在中心偏东地带，其质量分数整体由中心向四周减小，与 AK 分布类似。2 号样地的 SOM 含量分布由北向南先逐渐降低再增大，质量分数在 24 g/kg 以下的位于中心偏下的东南部，低值区明显。AP 分布相对均匀，高值区位于南部偏西，有 2 个明显的低值区，分散于西北部和中东部。AK 含量整体偏高，分布趋势为中心向四周逐渐减小，中心处高值区突变到 2 个临近低值区。NO_3^--N 的质量分数分布显示在 150 mg/kg 以上的处于西北部和中部，越靠近边缘，养分含量降低越明显，尤其以东南角最低。

抽穗期的两样地的各指标分布趋势极其相似，SOM 含量由北向南呈先增大后减小的趋势，AK 和 NO_3^--N 均为自地块中心向四周减小的趋势，AP 含量分布差异较大，1 号样地为北高南低，2 号样地则相反。

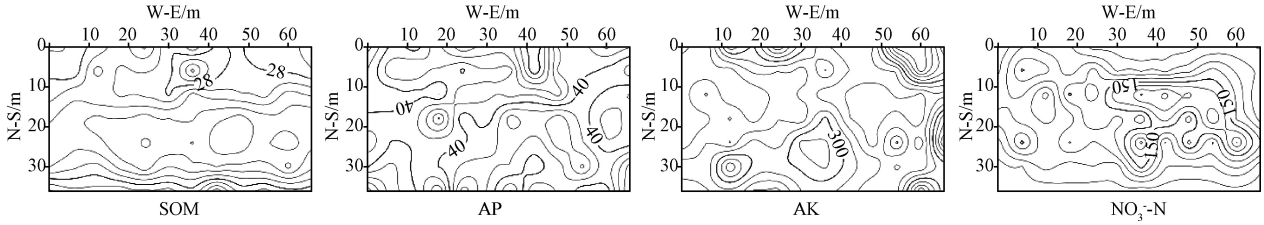
由图 2 可以看出，成熟期的 2 块样地 SOM 含量北部高值，南部低值；AP、NO_3^--N 含量分布均匀，AK 含量分布差异较大，1 号样地为北高南低，2 号样地低值区位于中部。

不论是抽穗期还是成熟期，2 块样地的 TN 和 NH_4^+-N 的空间分布较为相似，分布均匀，两者之间有较强的空间耦合性，没有明显的高值区。因此，不在图中表示。

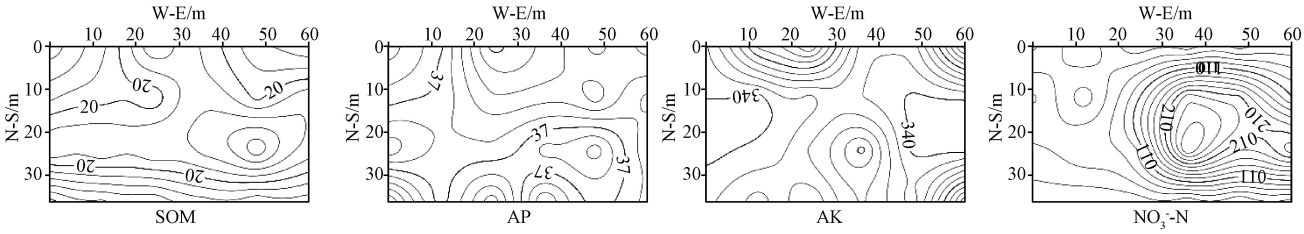
2 种网格结果对比发现，当扩大采集间距，随着采样点数的减少，土壤养分分布高低值区域更加明显，弱化了部分养分分布状况，但高低值位置基本不变。

3　讨　论

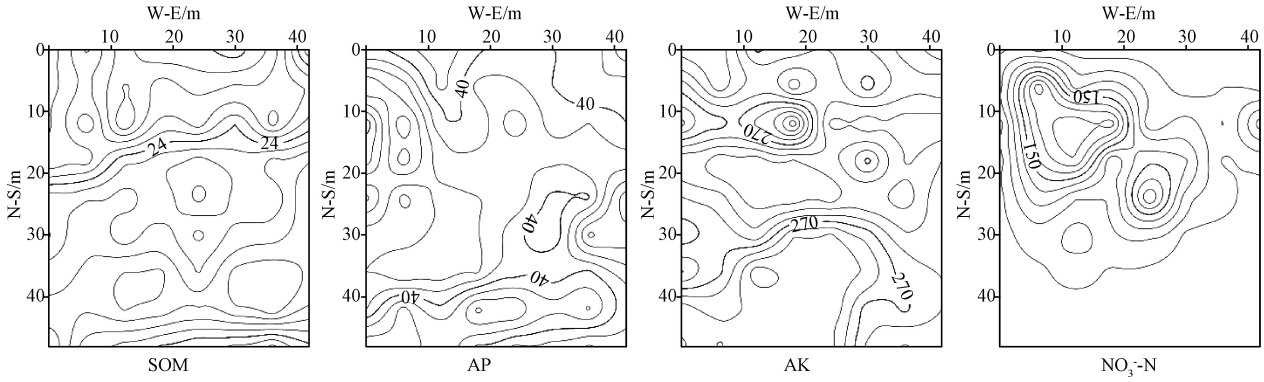
农业技术措施与农田表层土壤速效态养分的空间变异密切相关。施肥方式和技术必然会影响土壤养分的空间变异性，施肥前后土壤养分空间变异性差距非常大。但是施肥前或者施肥较长一段时间后，通过土壤养分转化以及作物消耗后，土壤养分空间变异性具有一定的稳定性趋势，为此在抽穗初期追施肥料前和收获后均进行了取样测土。本研究发现农田 AK 和 NO_3^--N、NH_4^+-N 的变异系数较大。田间土壤养分的主要来源之一是施肥[29]，农田中施入氮磷钾肥后，水分对肥料中的可溶态离子产生一定的运移作用，在淹水条件下，氧化还原电位降低使得土壤养分含量自身也发生一些变化[30]。此外速效态养分由于迁移性强和稳定性较差的特性，导致其变异系数较大[5]，如施入土壤中的钾。由于抽取的样地未在冬小麦播种前展开调查研究，无法控肥，2 号样地较 1 号样地增施油渣（当地经验，有补钾的作用），钾元素因其移动性较大、当季利用率较高、土壤钾收支平衡一般为亏缺而使钾肥在土壤中残留较少[31]，致使 2 号样地土壤中的 AK 受影响较大。TN 的离散程度和变异系数极小，可能是受成土母质的影响较大，也可能是在测量尺度上土壤的非均质性很小[12]。此外，AK 和 NO_3^--N、NH_4^+-N 变异系数>100%，呈强变异，通过 Cochran 合理采样数公式进行计算，在 95%置信水平，相对误差范围 5%内，最佳采样数小于试验布设点数，本研究土壤采样数合理。



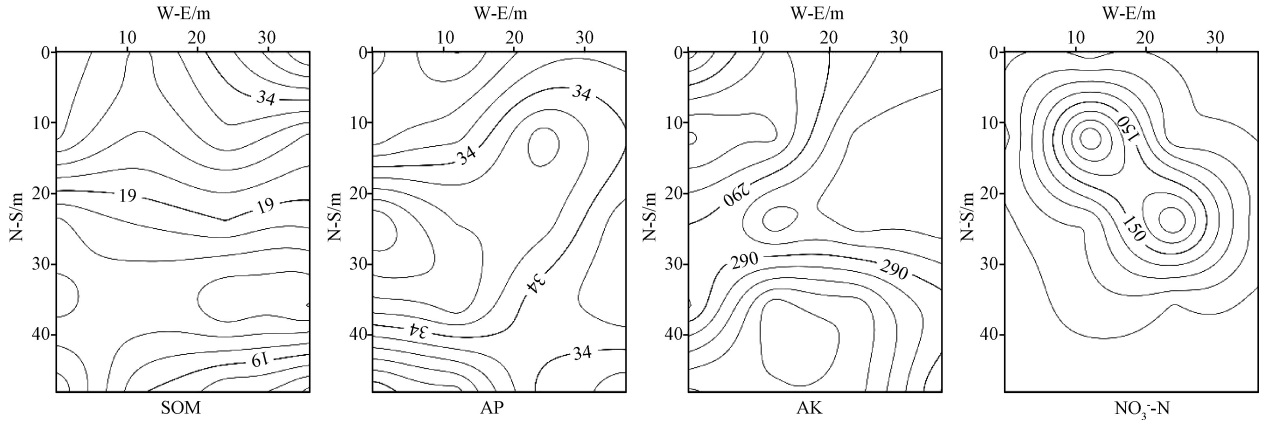
a. 1 号样地 6m×6m 网格
a. 6 m×6 m grid of the test field 1



b. 1 号样地 12m×12m 网格
b. 12 m×12 m grid of the test field 1



c. 2 号样地 6m×6m 网格
c. 6 m×6 m grid of the test field 2



d. 2 号样地 12 m×12 m 网格
d. 12 m×12 m grid of the test field 2

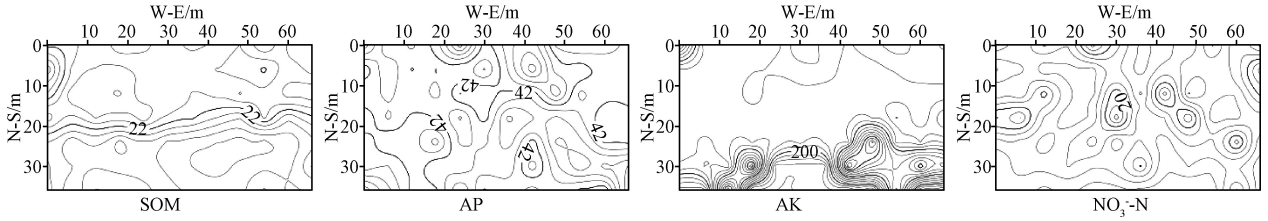
注：N-S 代表北-南方向；W-E 代表西-东方向。SOM 代表土壤有机质，$g\cdot kg^{-1}$；AP 代表有效磷，$mg\cdot kg^{-1}$；AK 代表速效钾，$mg\cdot kg^{-1}$；NO_3^--N 代表硝态氮，$mg\cdot kg^{-1}$。 下同。

Note: N-S indicates north to south; W-E indicates west to east. SOM indicates soil organic matter, $g\cdot kg^{-1}$; AP indicates the available phosphorus, $mg\cdot kg^{-1}$; AK indicates the available potassium, $mg\cdot kg^{-1}$; NO_3^- -N indicates the nitrate nitrogen, $mg\cdot kg^{-1}$. The same as below.

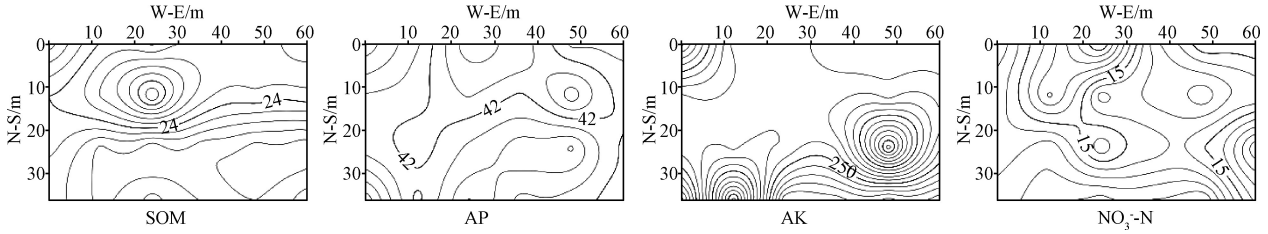
图 1 抽穗期土壤养分分布等值线图

Fig.1 Contour map of soil nutrient distribution at the heading stage

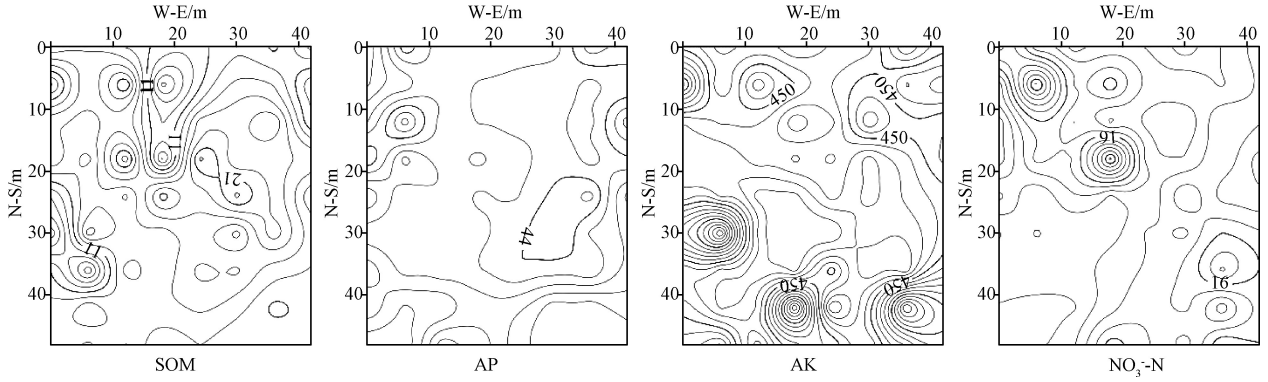
农田土壤养分分布空间变异性大小主要由结构性变异主导。王珂等[32]发现小尺度的农田土壤养分空间分布的半方差模型均符合球状模型，本研究也验证了这一规律。不同区域、不同时期虽受地形、土壤类型、质地等影响[12]，但小尺度下的农田土壤养分空间变异性呈弱变异或中等变异。本研究发现农田 SOM、AP、TN 变异度小，空间变异主要来自结构性因素，尽管人为活动对 SOM、AP、TN 空间相关性有一定的影响，但并未对其原有的养分分布格局产生强烈的破坏作用。AK、NO_3^--N、NH_4^+-N 变异度较大，说明农业技术措施等人为活动的影响程度很大，削弱了结构性因素造成的强烈空间自相关作用，原因可能是当地农户在连年耕作中长期大量施肥所致[31]。



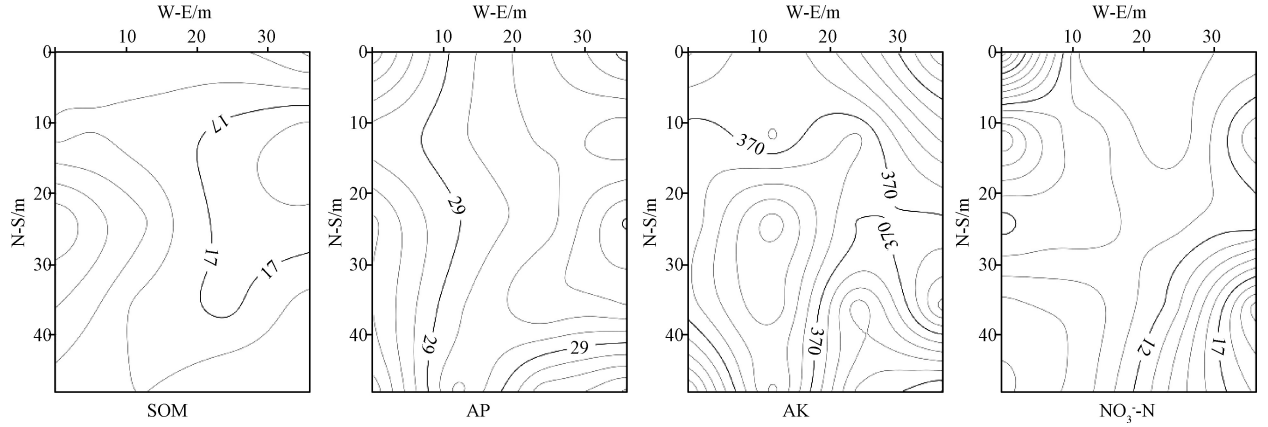
a. 1 号样地 6 m×6 m 网格
a. 6 m×6 m grid of the test field 1



b. 1 号样地 12 m×12 m 网格
b. 12 m×12 m grid of the test field 1



c. 2 号样地 6 m×6 m 网格
c. 6 m×6 m grid of the test field 2



d. 2 号样地 12 m×12 m 网格
d. 12 m×12 m grid of the test field 2

图 2　成熟期土壤养分分布等值线图
Fig.2　Contour map of soil nutrient distribution at the ripening stage

半方差分析和Kriging插值揭示了大部分土壤性质的空间分布模式具有中到强的空间依赖性[23]规律。TN 和 NH_4^+-N 的空间分布较为相似，两者之间存在一定相关性。NO_3^--N 的含量分布与 TN、NH_4^+-N 分布没有任何关联，表明 TN 中虽包含 NO_3^--N，但并不能代表其含量的分布情况。林建平等[5]研究发现，在大尺度范围内南方典型丘陵山区耕地土壤 SOM 与 TN 的含量关系呈正相关。王淑英等[33]发现当采样间距大于 100m 时，采样尺度对土壤 SOM 与 TN 含量的空间变异性差异显著。本试验在农田尺度上，采样间距总体较小，土壤 SOM 与 TN 之间没有明显的相关性，采样尺度与研究问题的性质密切相关[34]。土壤有机质与黏粒组成的有机-无机胶体是交换性阳离子

的基本载体，具有突出的保钾作用[3]，本研究空间分布等值线图结果表明 SOM 和 AK 没有相关性，可能一年两茬的耕作次数，不利于土壤有机质的积累。也可能自然植被在土地平整过程中被消除，SOM 来源减少，又由于人工翻动土壤，使得土壤透气性增强，有机氮矿化过程加速[3]。参照全国第二次土壤普查分级标准，本试验抽穗期土壤 SOM 和 TN 含量为 3 级中等偏下水平，AP、AK 含量为 2 级以上丰富水平（表 3），成熟期土壤 SOM 含量降为 4 级，付莹莹[35]也研究发现关中土壤缺氮、磷中等、富钾。此外，各指标的等值线图中大部分的空间分布为突变而非渐变，一定程度上验证养分的空间异质性，这与林建平等[5]大尺度的空间异质性研究观点一致。

采样网格间距影响农田土壤养分空间异质性分布规律的表达。农田尺度下土壤养分样点布设密度过大浪费资源，样点布设密度过小则直接降低土壤养分空间分布的表征度，选取适宜的采样间距十分必要。本研究发现 12 m×12 m 与 6 m×6 m 2 种网格划分下的各指标差值大部分为负值（表 2），尤其是速效态养分变化较大，土壤养分分布规律不显著，扩大网格势必降低了对田间土壤空间变异的表达度和可信度。采样间距影响采样数目，同一采样间距、不同土壤养分指标的采样数各不相同。但实践中，针对每个养分指标都确定一个采样数不符合实际，应该在平衡各养分指标变异度及农业生产实践的前提条件下，选取一个合适的采集密度。本研究中 12 m×12 m 网格用于调研采样优于 6 m×6 m 网格，建议精量灌溉系统末端养分监测点布设间距为 12 m×12 m，可大幅减少采样点数和分析成本。此外，小尺度下的农田土壤养分空间变异性呈弱变异或中等变异，半方差模型均符合球状模型，空间变异性主要由结构性变异主导，空间分布模式具有中到强的空间依赖性规律等结果具有普遍性。已有研究报道了类似环境下 Soil-Landscape Models 的可转移性，即在相似的土壤形成环境中，2 个地区的土壤性质空间变化也将是相似的[36]。所以将一个地区的克里格方差与网格间距的关系转换到另一个类似环境的地区是合理的。因此，本文试图展开详尽的田间采样，揭示农田土壤养分空间分布规律，便于养分监测设施的布设和农田土壤养分的管理。

4 结 论

1）农田土壤全氮、土壤有机质、有效磷的空间变异性属于弱到中等变异；速效钾和铵态氮属于强变异；冬小麦生育阶段不同，其变异性不同，硝态氮抽穗期为强变异，成熟期为中等变异，其余指标变异程度保持不变。

2）农田表层土壤养分适宜的半方差模型为球状模型。冬小麦农田土壤有机质、全氮块金系数<25%，空间自相关性强烈；而速效态养分有效磷、速效钾、硝态氮、铵态氮块金系数在抽穗期>25%，空间相关性弱，成熟期空间相关性增强，块金系数<25%。

3）农田土壤有机质、全氮的变异性由结构性因素主导，速效态养分则由随机性因素主导，受施肥、作物消耗等因素影响较大。

4）采样间距对农田土壤养分空间变异性分析结果的影响较小，有机质、有效磷、速效钾、全氮、硝态氮和铵态氮变异系数差值在 0.04%～59.48%范围内,成熟期 2 号样地的速效钾除外（398%）；块金系数差值在 0.065%～34.177%范围内，2 种采样间距获得的土壤养分空间变异特征基本一致，推荐使用 12 m×12 m 网格采样，以节约成本，提高效益。

[参 考 文 献]

[1] 何东健，杨成海，杨青，等. 面向精准农业的农田土壤成分实时测定研究进展[J]. 农业工程学报，2012，28(7)：78-85.
He Dongjian, Yang Chenghai, Yang Qing, et al. Research progress of real-time measurement of soil attributes for precision agriculture[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2012, 28(7): 78-85. (in Chinese with English abstract)

[2] Gouri S B, Pravat K S, Rabindranath C. Assessment of spatial variability of soil properties using geostatistical approach of lateritic soil (West Bengal, India)[J]. Annals of Agrarian Science, 2018, 16: 436-443.

[3] 刘靖朝，熊黑钢，何旦旦，等. 基于不同人为干扰的土壤全量氮磷钾空间变异性研究[J]. 干旱地区农业研究，2019，37(1)：116-122，159.
Liu Jingchao, Xiong Heigang, He Dandan, et al. Spatial variability of total nitrogen, phosphorus, and potassium in soil under different human disturbances[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2019, 37(1): 116-122, 159. (in Chinese with English abstract)

[4] Liu Yang, Lv Jianshu, Zhang Bing, et al. Spatial multi-scale variability of soil nutrients in relation to environmental factors in a typical agricultural region, eastern China[J]. The Science of the Total Environment, 2013(450/451): 108-119.

[5] 林建平，邓爱珍，赵小敏，等. 南方典型丘陵山区不同高程耕地土壤养分变化特征分析[J]. 农业机械学报，2019，50(5)：300-309.
Lin Jianping, Deng Aizhen, Zhao Xiaomin, et al. Variation characteristics of soil nutrients of cultivated land in different elevation fields in typical hilly areas of southern mountains[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(5): 300-309. (in Chinese with English abstract)

[6] 张伟，陈洪松，王克林，等. 喀斯特地区典型峰丛洼地旱季表层土壤水分空间变异性初探[J]. 土壤学报，2006，43(4)：554-562.
Zhang Wei, Chen Hongsong, Wang Kelin, et al. Spatial variability of surface soil water in typical depressions between hills in karst region in dry season[J]. Acta Pedologica Sinica, 2006, 43(4): 554-562. (in Chinese with English abstract)

[7] Duraisamy V, Singh S K, Nisha S, et al. Assessment of spatial variability of soil properties using geospatial techniques for farm level nutrient management[J]. Soil & Tillage Research, 2017, 169: 25-34.

[8] 祝鑫海，张远智，杨少斌. 北京市核心区土壤养分空间变异特征[J]. 福建农林大学学报：自然科学版，2018，47(5)：580-586.
Zhu Xinhai, Zhang Yuanzhi, Yang Shaobin. Spatial variability of soil nutrients in the core area of Beijing[J]. Journal of Fujian Agriculture and Forestry University (Natural Science Edition), 2018, 47(5): 580-586. (in Chinese with English abstract)

[9] Li Shan, Li Qiquan, Wang Changquan, et al. Spatial variability of soil bulk density and its controlling factors in an agricultural intensive area of Chengdu Plain,Southwest

China[J]. Journal of Integrative Agriculture, 2019, 18(2): 290-300.

[10] 张国平，郭澎涛，王正银，等. 紫色土丘陵地区农田土壤养分空间分布预测[J]. 农业工程学报，2013，29(6)：113-120.
Zhang Guoping, Guo Pengtao, Wang Zhengyin, et al. Prediction of spatial distribution of hilly farmland with purple soil nutrients[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2013, 29(6): 113-120. (in Chinese with English abstract)

[11] 张子璐，左昕弘，刘峰，等. 渝西丘陵区土壤速效钾空间异质性及影响因素[J]. 土壤学报，2020，57(2)：307-315.
Zhang Zilu, Zuo Xinhong, Liu Feng, et al. Spatial heterogeneity of soil readily available potassium and its influencing factors in Western Chongqing hilly areas, China[J]. Acta Pedologica Sinica, 2020, 57(2): 307-315. (in Chinese with English abstract)

[12] Duminda N V G,Asim B,Ian B S. Spatial variability of soil thermal properties and their relationships with physical properties at field scale[J]. Soil & Tillage Research, 2019, 193: 50-28.

[13] 姚彩燕，刘绍贵，乔婷，等. 基于时空变异的旱地土壤有机碳高效采样策略研究[J/OL]. 土壤学报，2020 [2020-08-04].http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1119.p.20200310.1814.007.html.
Yao Caiyan, Liu Shaogui, Qiao Ting, et al. Strategy for efficient sampling strategy of upland soil based on spatiotemporal variation of the soil[J/OL]. Acta Pedologica Sinica, 2020 [2020-08-04]. http://kns. cnki.net/kcms/detail/32.1119.p.20200310. 1814.007.html. (in Chinese with English abstract)

[14] 苏芝屯，吴春燕，何彤慧，等. 银川平原草甸湿地土壤养分特征与植物响应[J]. 干旱区研究，2019，36(4)：816-823.
Su Zhitun, Wu Chunyan, He Tonghui, et al. Soil nutrient characteristics and plant response of meadow wetland in Yinchuan Plain[J]. Arid Zone Research, 2019, 36(4): 816-823. (in Chinese with English abstract)

[15] 孟红旗，郭晓明，杨英，等. 采煤沉陷坡面土壤氮磷钾养分有效性的空间变异性[J/OL]. 土壤学报，2020：1-12 [2020-08-04].http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1119.P.20190916.1120.004.html.
Meng Hongqi, Guo Xiaoming, Yang Ying, et al. Spatial Variability of Soil Nitrogen, Phosphorus and Potassium Availability in Coal Mining Subsidence Slopes [J/OL]. Acta Pedologica Sinica, 2020: 1-12 [2020-08-04]. http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1119. P.20190916.1120.004.html. (in Chinese with English abstract)

[16] 王晓琳，王丽梅，张晓媛，等. 不同植被对晋陕蒙矿区排土场土壤养分 16a 恢复程度的影响[J]. 农业工程学报，2016，32(9)：198-203.
Wang Xiaolin, Wang Limei, Zhang Xiaoyuan, et al. Effects of different vegetation on soil nutrients remediation degree in earth disposal site after 16a in mining area of Shanxi-Shaanxi-Inner Mongolia adjacent region[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2016, 32(9): 198-203. (in Chinese with English abstract)

[17] 鲁天平，史征，刘永萍，等. 深沟造林条件下秸秆覆盖对土壤养分和盐分变化的影响[J]. 农业工程学报，2015，31(12)：165-172.
Lu Tianping, Shi Zheng, Liu Yongping, et al. Effects of straw mulching on soil nutrients and salinity changes under condition of deep trench planting[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2015, 31(12): 165-172. (in Chinese with English abstract)

[18] Asim B. Scale-location specific soil spatial variability: A comparison of continuous wavelet transform and Hilbert-Huang transform[J]. Catena, 2018, 160: 24-31.

[19] Jacopo D, Renato M, Carla S, et al. Spatial-temporal variability of soil moisture: Addressing the monitoring at the catchment scale[J]. Journal of Hydrology, 2019, 570: 436-444.

[20] Vanessa A G, Lázaro V Z, J Jaime G H. Spatial variability of hydraulic conductivity and solute transport parameters and their spatial correlations to soil properties[J]. Geoderma, 2019, 339: 59-69.

[21] Stacey P, Budiman M, Alex M. Spatial variability of Australian soil texture: A multiscale analysis[J]. Geoderma, 2018, 309: 60-74.

[22] Leung Yat Fai, Liu Wenfei, Li Jiangshan, et al. Three-dimensional spatial variability of arsenic-containing soil from geogenic source in Hong Kong: Implications on sampling strategies[J]. The Science of the Total Environment, 2018, 633: 836-847.

[23] Sanjib K B, Ravi K M, Arvind K S, et al. Spatial variability of soil properties and delineation of soil management zones of oil palm plantations grown in a hot and humid tropical region of southern India[J]. Catena, 2018, 165: 251-259.

[24] 杨奇勇，杨劲松，姚荣江，等. 基于 GIS 和改进灰色关联模型的土壤肥力评价[J]. 农业工程学报，2010，26(4)：100-105.
Yang Qiyong, Yang Jinsong, Yao Rongjiang, et al. Comprehensive evaluation of soil fertility by GIS and improved grey relation model[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2010, 26(4): 100-105. (in Chinese with English abstract)

[25] Anna P D, Barbara B B, Jacek D. Spatial and temporal variability of the soil microbiological properties in two soils with a different pedogenesis cropped to winter rape (*Brassica napus* L.)[J]. Geoderma, 2019, 340: 313-324.

[26] 薛正平，杨星卫，段项锁，等. 土壤养分空间变异及合理取样数研究[J]. 农业工程学报，2002，18(4)：6-9.
Xue Zhengping, Yang Xingwei, Duan Xiangsuo, et al. Spatial variability of soil nutrients and reasonable sampling number[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2002, 18(4): 6-9. (in Chinese with English abstract)

[27] 张兆永，李菊英，祖皮艳木·买买提，等. 艾比湖流域小尺度农田土壤养分的空间分布和盐渍化风险评价[J]. 生态学报，2017，37(3)：819-828.
Zhang Zhaoyong, Li Juying, Zu Piyanmu·Maimati, et al. Spatial heterogeneity of soil nutrients and salinization risk assessment of a small-scale farmland in Ebinur basin in northwest China [J]. Journal of Ecology, 2017, 37(3): 819-828. (in Chinese with English abstract)

[28] 乔磊，黄明镜，张吴平，等. 晋中盆地典型耕地厚度、土壤养分空间变异[J]. 中国农学通报，2020，36(1)：89-97.
Qiao Lei, Huang Mingjing, Zhang Wuping. Thickness and soil nutrients of typical cultivated land in Jinzhong basin:spatial variation[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2020, 36(1): 89-97. (in Chinese with English abstract)

[29] 温延臣，李燕青，袁亮，等. 长期不同施肥制度土壤肥力特征综合评价方法[J]. 农业工程学报，2015，31(7)：91-99.
Wen Yanchen, Li Yanqing, Yuan Liang, et al. Comprehensive assessment methodology of characteristics of soil fertility under different fertilization regimes in North China[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2015, 31(7): 91-99. (in Chinese with English abstract)

[30] 徐姗. 淹水对土壤养分分布、玉米养分吸收动态及生长的影响[D]. 合肥：安徽农业大学，2012.
Xu Shan. Impact on the Soil Nutrient Distribution, Maize Nutrients Uptake and its Growth Under Flooded

Conditions[D]. Hefei: Anhui Agricultural University, 2012. (in Chinese with English abstract)

[31] 李中元. 贵州喀斯特山区村级尺度下农田土壤养分空间变异与采样设计研究[D]. 贵阳：贵州大学，2008.
Li Zhongyuan. Study on the Soil Nutrients Spatial Variability and Reasonable Distances of Soil Sampling Design under the Village Level Scale of Karst Regions in Guizhou Province[D]. Guiyang: Guizhou University, 2008. (in Chinese with English abstract)

[32] 王珂，沈掌泉，John S Bailey，等. 精确农业田间土壤空间变异与采样方式研究[J]. 农业工程学报，2001，17(2)：33-36.
Wang Ke, Shen Zhangquan, John S Bailey, et al. Spatial variants and sampling strategies of soil properties for precision agriculture [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2001, 17(2): 33-36. (in Chinese with English abstract)

[33] 王淑英，路苹，王建立，等. 不同研究尺度下土壤有机质和全氮的空间变异特征：以北京市平谷区为例[J]. 生态学报，2008，28(10)：4957-4964.
Wang Shuying, Lu Ping, Wang Jianli, et al. Spatial variability and distribution of soil organic matter and total nitrogen at different scales:a case study in Pinggu County, Beijing[J]. Acta Ecologica Sinica, 2008, 28(10): 4957-4964. (in Chinese with English abstract)

[34] 徐英，陈亚新，史海滨，等. 土壤水盐空间变异尺度效应的研究[J]. 农业工程学报，2004，20(2)：1-5.
Xu Ying, Chen Yaxin, Shi Haibin, et al. Scale effect of spatial variability of soil water-salt[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2004, 20(2): 1-5. (in Chinese with English abstract)

[35] 付莹莹. 陕西关中地区土壤养分丰缺指标体系的建立[D]. 杨凌：西北农林科技大学，2009.
Fu Yingying. The Establishment of Soil Nutrient Index in Guanzhong areas, Shaanxi province[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2009. (in Chinese with English abstract)

[36] Sun Xiaolin, Wang Huili, Dermot F, et al. Limited spatial transferability of the relationships between Kriging variance and soil sampling spacing in some grasslands of ireland: implications for sampling design[J]. Pedosphere, 2019, 29(5): 577-589.

Spatial variability of soil nutrients in topsoil of cultivated land

Wang Jie[1,2], Niu Wenquan[1,3※], Zhang Wenqian[1,2], Li Guochun[3], Sun Jun[1,2], Wang Yanbang[1,2]

(1. *Key Laboratory of Agricultural Soil and Water Engineering in Arid and Semiarid Areas, Ministry of Education, Northwest A&F University, Yangling* 712100, *China*; 2. *College of Water Resources and Architectural Engineering, Northwest A&F University, Yangling* 712100, *China*; 3. *Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling* 712100, *China*)

Abstract: Crop productivity depends mostly on water management and soil nutrients in the cultivated land. Taking Caoxinzhuang farmland in Yangling as the study area, this study aims to provide a sound basis for the layout of field nutrient monitoring facilities, in order to investigate farmland soil nutrients. Two sampling places were selected, concurrently named as test field 1 (farmland) and test field 2 (farmland), respectively. Specifically, test field 1 was newly reclaimed wasteland, whereas, test field 2 was the cultivated all year round, mainly wheat-corn rotation. The selected field was divided into 12 m×12 m nested 6 m×6 m plots, based on the soil nutrient samples collected in the topsoil (0-20 cm) of different fields during the growth stage of winter wheat. Classical statistical analysis and Geostatistics with Kriging method were employed to explore the characteristics of soil nutrient variability. SPSS22.0 software was used for the descriptive statistical analysis and normal distribution test. According to the Cochran optimal sampling quantity calculation formula, the optimum sampling number of each nutrient index in the field soil was determined.GS^+ software (version 9.0, Gamma Design Software, USA) was used to perform a spatial semi-variogram analysis of soil nutrients, and further to adjust different model parameters for model fitting, including determination coefficient R^2. Kriging interpolation and cross validation were carried out using the Geostatistics Analysis module in ArcGIS10.5. Sufer software (version 13.0, Golden Software, USA) was used to represent the spatial variation of parameters, including the soil organic matter (SOM), available phosphorus (AP), available potassium (AK), total nitrogen (TN), nitrate nitrogen (NO_3^--N), and ammonium nitrogen (NH_4^+-N). The results show that during the heading and ripening stages of winter wheat, the variation coefficient (CV) of total nitrogen (TN) <10% in the surface soil of farmland, indicating a weak variation, while, the CV of soil organic matter (SOM) and available phosphorus (AP) were between 10% and 100%, indicating a moderate variation. There was a strong variation coefficient (CV) >100% in the available potassium (AK) and the ammonium nitrogen (NH_4^+-N). The nitrate nitrogen (NO_3^--N) changed from strong variation to moderate variation during the ripening stages of winter wheat. The optimal spherical model can be achieved in the semi-variable function model of soil nutrients. It infers that there were some differences in the spatial correlation of soil nutrients at different stages of crop growth. The nugget coefficient of soil organic matter (SOM) and the total nitrogen (TN) were less than 25% at two growth stages, indicating a strong spatial correlation that mainly affected by structural factors. There was a relatively large variability in the quick-acting nutrients, including the available phosphorus (AP), the available potassium (AK), the nitrate nitrogen (NO_3^--N), and the ammonium nitrogen (NH_4^+-N), where the nugget coefficient was between 25% and 75% at the heading stages of winter wheat, indicating the significant role of random factors. At the ripening stages, the nugget coefficient of quick-acting nutrients was less than 25%, indicating the enhanced spatial correlation. When the sampling interval was expanded from 6 m × 6 m to 12m × 12m, the degree of variation remained constant, while the variation coefficient difference of each index fluctuated within the range of 0.04%-59.48%, except for available potassium (398%) in the ripening stage of test field 2. In each index, the difference of nugget coefficient fluctuated within the range of 0.065%-34.177%, while the spatial variation distribution remained basically consistent. The 12 m×12 m grid can be recommended for the topsoil nutrient sampling.

Keywords: soil; nutrients; spatial variability; geostatistics; sampling grid spacing