

苹果主产区土壤养分空间分布特征及其影响因素^①

——以陕西省礼泉县为例

张彬¹, 杨联安^{1*}, 杨粉莉², 王卫东³, 袁晓育³,
张林森⁴, 谢贤健⁵, 杨煜岑¹, 杜挺¹

(1 西北大学城市与环境学院, 西安 710127; 2 咸阳市农业科学研究所, 陕西咸阳 712000; 3 礼泉县土壤肥料工作站, 陕西咸阳 713200;
4 西北农林科技大学园艺学院, 陕西杨凌 712100; 5 内江师范学院地理与资源科学学院, 四川内江 641000)

摘要: 客观、量化分析土壤养分空间异质性及其影响因素, 可为作物精准施肥提供科学依据。本研究以陕西省礼泉县苹果产区为研究区, 基于“S”形的样点布设法采集果园 0~40 cm 土层的土壤样品, 运用地统计学和 GIS 研究了土壤有机质、碱解氮、速效钾和有效磷 4 种养分的预测精度, 并通过交叉验证和相对预测误差确定最优预测模型, 绘制果园土壤养分空间分布图, 综合分析土壤养分空间分布特征, 并结合相关性分析和多元线性回归分析, 探讨土壤养分的影响因素及其权重。结果表明: 在最佳变异函数理论模型下, 普通克里格法对果园土壤碱解氮的预测精度高, 协同克里格对其他 3 种养分的预测精度高。土壤有机质的空间分布格局是由骏马-阡东和建陵-昭陵一带向中部递减; 赵镇至史德镇的东部为碱解氮的高值区, 分别向东、北和西南递减; 速效钾的高值区主要分布在研究区南部, 北部大多数地区钾含量偏低; 有效磷的高值区分布在烽火和骏马镇、石潭-昭陵镇一线。有机质与地形因子具有显著相关性, 碱解氮受 NDVI、土壤类型和地形因子的影响, 速效钾与当地坡度、坡向具有显著相关性, 但有效磷与三大类因子的相关性不显著。

关键词: 土壤养分; 空间分布特征; 影响因素; 协同克里格; 多元线性回归; 礼泉县

中图分类号: S158.2

土壤是不均一、变化的时空连续体, 土壤养分空间分布具有非均一性和影响因素的多元性, 准确探究其空间分布特征及其主导因素, 可为建立养分数字化管理信息系统、精准施肥、合理利用土壤资源和维护陆地农业生态系统提供理论和技术指导^[1-3]。

客观、精确了解某区域的土壤养分空间分布特征, 依赖于适应性强、预测精度高的土壤养分数字制图方法。国内外学者对土壤养分制图方法做了大量研究, 集中在经典统计学、地统计插值及遥感数字制图等。李翔等^[4]利用线性回归预测了有机质的空间分布, 表明其预测精度较低, 精度随采样点的增加基本不变。张国平等^[5]利用多重线性回归构建了土壤养分预测模型, 但其精度受辅助因子的影响较大; 周睿等^[6]、于洋等^[7]利用普通克里格(Ordinary

Kriging, 简称 OK)分别对土壤有机质、速效养分进行空间插值; 李润林等^[8]、黄安等^[9]采用协同克里格(Cokriging, 简称 COK)分别对土壤锌、综合养分指标进行空间插值, 选取相关性强的因子作为辅助因子, 其预测精度高; Roger 等^[10]、张世文等^[11]以地形因子、湿度指数等环境因子作为辅助数据, 对土壤养分或土壤质量指数进行回归克里格插值, 表明线性回归与克里格相结合能提高土壤养分预测精度。此外, 随着地理空间信息技术的发展, 遥感制图也应用于土壤养分制图研究, 如宋金红等^[12]基于 TM 影像实现了有机质含量的空间格局反演研究, 王茵茵等^[13]基于多分辨率遥感数据和随机森林算法实现了土壤有机质的预测研究。以上研究, 从单项养分指标和综合养分指标及其辅助因子相结合角

基金项目: 教育部人文社会科学研究规划项目(10YJA910010), 陕西省农业科技攻关项目(2011K02-11), 农业部现代苹果产业技术体系肥水高效利用岗位基金项目(NCYTX-08), 西安市科技计划农业技术研发项目(NC150201; NC1402)和西北大学“211工程”研究生自主创新项目(YZZ15013; YZZ14013)资助。

* 通讯作者(yanglian@163.com)

作者简介: 张彬(1991—), 男, 四川巴中人, 硕士研究生, 主要研究地理信息系统在农业中的应用。E-mail: westzbin@163.com

度,探索了多种土壤养分数字制图方法,为其精确预测土壤养分空间分布奠定了基础,同时,也为进一步客观、准确分析其空间分布的影响因素提供了条件。土壤养分空间分布既受母质、生物、气候、时间和地形等自然成土因素的影响,也受施肥结构、耕作措施和种植制度等人类活动的影响^[14]。邓欧平等^[15]、吴昊^[16]研究表明地形因子与土壤养分空间分布具有很强的相关性;土壤类型是影响土壤养分空间分布特征的主要因素之一^[17];同时,植被覆盖度的大小影响土壤养分的空间分布^[18]。总的来说,土壤养分空间分布特征的影响因素是多元的,客观分析其区域的养分影响因素,为该地因地制宜、实现土地可持续利用具有重要现实意义。

土壤养分状况是影响苹果产量、果实品质的重要因素^[19-20]。苹果区土壤养分是自然因素和人为因素长期作用的结果,空间分布不均且影响因素复杂,因此有必要综合分析其土壤养分空间分布特征及其影响因素。传统制图方法具有耗时长和精度较低等缺点,遥感养分制图技术要求高和适应性不强,地统计养分制图技术具有适应性强和精度较高,能满足土壤养分空间分布特征研究的需要。本研究采用地统计学和 GIS 相结合,分析 OK 和 COK 对果区土壤养分数字制图的适应性,确定各养分的最优预测模型,综合分析果区土壤养分的空间分布特征,并利用相关分析和多元线性回归探讨果区土壤养分的主要影响因素及其定量权重,为苹果区测土配方施肥提供技术和理论依据,并为土壤养分空间变异研究提供新思路。

1 研究区概况与数据制备

1.1 研究区概况

礼泉县是我国优质苹果的主要生产基地之一,

被誉为“中国苹果第一大县”。礼泉县地处陕西省关中平原和渭北旱塬交汇地带,地理位置 108°17'40"~108°41'46"E,34°20'50"~34°50'02"N,总面积 1 010 km²,辖 11 镇 4 乡;地势为西北高、东南低,海拔在 402~1 467 m,地貌以北部低山丘陵沟壑区,中部残塬和南部台塬为主;该县属于暖温带半干旱大陆性气候,年日照时数 2 215.6 h,年均气温 12.0℃,年均降水量 534 mm,且季节分配不均;成土母质以黄土为主,主要土壤类型为黑垆土、黄土、褐土和红土等,质地多为轻壤、砂壤、黏壤、中壤及中偏轻;植被以多年生禾本科、菊科和蔷薇科为主。

1.2 实验数据制备

1.2.1 土壤养分数据制备 综合考虑苹果树的生长年限和空间分布情况,根据全面、均衡和客观的原则,按照农业部测土配方施肥技术规范和要求,以树冠投影半径中心为采样点,采集果园 0~40 cm 深度土样,同时利用 GPS 进行跟踪,记录每个采样点的经纬度位置(图 1),基于“S”形均匀随机采取 8 个点,均匀混合后采取“四分法”取土样 1 kg。2012 年 11 月采集 294 份土样,带回实验室经过风干、研磨和过筛,分别测定土样养分指标。有机质含量的测定采用重铬酸钾法,碱解氮含量的测定采用碱解扩散法,速效钾含量的测定采用火焰光度计法,有效磷含量的测定采用 0.5 mol/L 的碳酸氢钠浸提-钼锑抗比色法。

1.2.2 成土影响因子数据 土壤养分空间分布受成土母质、土壤类型^[21]、地形因子^[15]、植被^[22]和土地利用方式^[23]等系统因子和随机因子的影响。结合前人的养分影响因素研究成果和当地实际情况,分析土壤类型(ST)、植被因子(NDVI)和地形因子(高程 H、坡度 SL 和坡向 AS)对果区土壤养分空间分布的

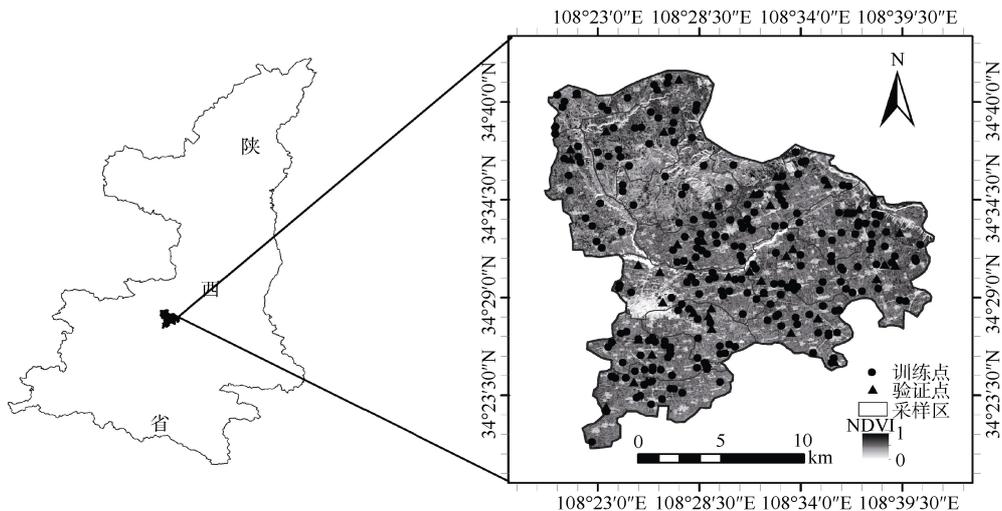


图 1 研究区位置及土壤采样点分布示意图
Fig. 1 Location of study area and soil sampling sites

影响程度。土壤类型因子来自礼泉县 1 : 5 万土壤类型图, 30 m 分辨率的遥感 OLI 影像和 DEM 均从中国科学院地理空间数据云网站下载, 通过遥感数字技术获取研究区 NDVI ,GIS 空间分析模块下的表面分析工具获得 SL 和 AS 因子。由于不同影响因子具有不同量纲, 针对 ST 和地形因子采取分级统计均值定权法, NDVI 采取像元线性拉伸, 其详细处理过程详见参考文献[24]。

1.3 数据处理与分析

采用平均值 ± 3 倍标准差法去除实验数据中的特异值, 利用 SPSS17.0 对果园土壤养分指标进行一般性统计描述及其与产量的方程拟合, 运用 ArcGIS10.1 软件对数据进行普通克里格和协同克里格制图精度研究, 使用子集模块分养分数数据为训练集(85%)和验证集(15%), 即 250 个训练样本和 44 个验证样本, 利用 ME、ASE 和 RMSE 等 6 类精度参数进行精度比较, 绘制果园土壤养分空间分布图, 并利用多元线性回归建模定量化分析土壤、地形和植被因子与土壤养分的关系。

2 研究方法

2.1 地统计空间插值

地统计学是以区域化变量理论为基础, 以变异函数为主要工具, 用来研究空间分布具有随机性和结构性特点的自然现象的科学[25]。其中, 克里格插值法在有限的区域内, 根据变异函数理论和结构分析, 通过无偏最优估计实现对区域化变量的插值。普通克里格法(OK)是指在满足前提假设条件下, 基于变量之间的空间自相关性, 利用半方差函数对原始数据的结构性分析, 对区域化变量的未知点进行最优无偏估值, 建立待估值点与已知点的线性关系[26], 其数学模型如下:

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

式中: n 表征实验样本数, λ_i 表示样点 x_i 处的实测值 $Z(x_i)$ 与估算值 $Z^*(x)$ 的权重比例。

与 OK 相比, 协同克里格(COK)是 OK 的改进与优化。COK 利用协同变量与主变量的强相关性, 将

主变量的自相关性与协变量的交互相关性相结合用于无偏最优估值中, 同时考虑一个或多个协变量对主变量的空间交互作用[27], 其数学模型如下:

$$Z^*(x_0) = \sum_{i=1}^n \lambda_i Z_1(x_i) + \sum_{j=1}^p \lambda_j Z_2(x_j) \quad (2)$$

式中: $Z^*(x_0)$ 是待插值点 x_0 位置的预测值, $Z_1(x_i)$ 代表主变量 Z_1 的实际测量值, $Z_2(x_j)$ 表示协同变量的实际测量值, λ_i 和 λ_j 分别表示主变量和协同变量在预测中所占的权重值, n 和 p 分别表示参与预测的主变量和协同变量数目。

2.2 多元线性回归分析

多元线性回归分析广泛应用于土壤养分预测及其影响因素研究, 定量刻画各成土因子对土壤养分的影响程度[14]。多元线性回归分析能有效集成多种影响因子, 能把空间非线性关系转换为线性关系, 促进土壤养分影响因素的定量研究。为提高模型的相对预测精度, 选取相关性强的因子进入模型, 其数学模型如下:

$$y = \sum_{i=1}^n a_n x_n = a_0 + a_1 x_1 + a_2 x_2 + a_3 x_3 + \dots + a_n x_n \quad (3)$$

式中: y 表示土壤某养分指标值, $x_n (n=1, 2, 3, \dots, n)$ 为各样点的成土因子, a_1, a_2, \dots, a_n 表示回归拟合系数, a_0 代表回归残差。

3 结果与分析

3.1 土壤养分一般性统计分析

从表 1 可知, 苹果区有机质、碱解氮、速效钾和有效磷 4 项养分指标的平均值分别为 10.701 g/kg、65.248 mg/kg、212.16 mg/kg 和 18.867 mg/kg, 根据陕西省渭北区苹果土壤养分丰缺分级情况[28], 研究区土壤养分分别属于偏低、适量、高量和适量。土壤有机质偏低与陕西省有机质整体水平偏低相吻合, 速效钾含量偏高, 且标准差大, 表明其含量高与土壤人工培肥有关。果区养分的变异系数均在 10%~100%, 呈中等程度空间变异, 其中有效磷变异程度最大, 这与养分特性和人类活动有关。综上所述, 果区土壤养分空间分布不均, 均呈中等空间变异。

表 1 苹果区土壤养分描述性统计及其与产量的拟合方程
Table 1 Descriptive statistics and equations of apple yield and soil nutrients contents

养分指标	变幅	平均值±标准差	变异系数	K-S	变换方式	拟合方程	R ²
有机质 (g/kg)	6.9 ~ 16.0	10.701 ± 1.598	14.93%	(2.998, 0.391)	NONE	$y = 11.317x^2 - 214.53x + 3421.9$	0.013
碱解氮(mg/kg)	21 ~ 134	65.248 ± 17.806	27.29%	(3.769, -0.386)	Log	$y = -0.1468x^2 + 15.149x + 2133.8$	0.043**
速效钾(mg/kg)	65 ~ 454	212.16 ± 82.956	39.10%	(2.539, -0.162)	Log	$y = 0.0013x^2 - 1.5857x + 2718.5$	0.018*
有效磷(mg/kg)	2.8 ~ 49.8	18.867 ± 9.426	49.96%	(2.935, -0.294)	Log	$y = -0.7906x^2 + 40.581x + 2036.7$	0.026

注: **, *分别代表在 $P < 0.01$ 、 $P < 0.05$ 水平(双侧)显著相关。

从正态分布检验结果可知,除了有机质的原始数据符合正态分布,其余 3 项养分指标经过 Log 转换之后,接近正态分布,满足地统计分析的数据要求。采用一元二次多项式分别回归拟合苹果产量与有机质、碱解氮、速效钾和有效磷的定量关系,其决定系数(R^2)相对较高,碱解氮和速效钾分别与苹果产量达到极显著、显著相关,其余养分指标与产量相关性不显著。

3.2 土壤养分空间分布特征分析

为了客观研究果区土壤养分的空间分布特征,采用 OK 和 COK 两种方法比较研究土壤养分的空间预测精度,利用 6 项交叉验证精度系数和相对预测误差指标,获取基于最优变异函数理论模型的最佳空间插值方法,绘制果区土壤养分空间分布图,分析其养分的空间分布特征。

3.2.1 土壤养分制图精度对比 利用 ArcGIS10.1 的地统计分析模块中的 OK 和 COK 内插方法,分别对训练集的 4 种养分指标进行空间内插。在 COK 内插中,各养分指标选取显著相关的其他养分指标作为辅助变量。为了对比研究交叉验证的结果,利用 ME(平均误差)、RMSE(均方根预测误差)、MESD(标准平均值)、RMSSD(均方根预测误差)、ASE(平均值标准误差)和 DABS($|RMSE-ASE|$)6 类精度参数作为判断依据(表 2)^[29],其中 ME 和 RMSE 值越小,精度越高, MESD 和 RMSSD 值分别越接近 0 和 1,精度越高;DABS 的值越小,其精度越高。

同时,利用验证集的相对预测误差进一步评价其内插方法的精度(表 3),确定每类养分指标的最佳插值方法。

结合表 2 和表 3 可知,在最优变异函数理论模型下,有机质的变异模型均为指数函数,与 OK 内插方法相比,COK 的 DABS 更小,RMSSD 更接近 1,验证集的极小值和均值的预测误差百分比分别为 8.05% 和 5.72%,分别小了 OK 的 0.16% 和 0.33%,总的来说,COK 方法更适合果区有机质的预测制图;碱解氮在 OK 和 COK 内插中最优变异函数分别为指数函数和球面函数,与 COK 内插方法相比,OK 的 RMSSD 更接近 1,DABS 参数小了 0.4581,同时验证集的均值预测误差小了 1.2%,表明果区碱解氮的 OK 预测制图精度更高;速效钾在 OK 和 COK 内插中最优变异函数分别为指数函数和高斯函数,COK 的 MESD 和 RMSSD 分别比 OK 更加接近 0 和 1,其 DABS 值更小,验证集的均值相对预测误差小了 OK 内插的 2.94%,分析表明 COK 的预测精度更高;有效磷的最优变异函数模型均为指数函数,其中 COK 的 ME、RMSE、ASE 和 DABS 均小于 OK,RMSSD 更加接近 1,验证集的均值相对预测误差小了 OK 的 8.95%,表明 COK 更加适宜预测果区有效磷的预测制图。综上所述,结合两种精度评判方法,在最优变异函数模型下,果区土壤有机质、速效钾和有效磷的 COK 空间内插方法精度更高,碱解氮的 OK 预测精度优于 COK。

表 2 OK 和 COK 的模型精度比较
Table 2 Accurate comparison on the model between Kriging and Cokriging

养分指标	内插方法	变异模型	ME	RMSE	MESD	RMSSD	ASE	DABS
有机质	OK	指数函数	0.008 4	1.642 9	0.006 3	1.023 1	1.604 3	0.038 6
	COK	指数函数	0.008 7	1.642 7	0.006 4	1.022 8	1.604 5	0.038 2
碱解氮	OK	指数函数	0.210 2	18.960 9	-0.047 6	0.995 2	19.994 3	1.033 4
	COK	球面函数	0.167 6	17.943 6	-0.004 7	0.947 6	19.435 1	1.491 5
速效钾	OK	指数函数	0.078 5	82.501 7	-0.032 5	0.988 6	87.267 6	4.765 9
	COK	高斯函数	0.246 4	82.213 6	-0.029 3	0.990 3	86.895 3	4.681 7
有效磷	OK	指数函数	0.215 5	9.412 3	-0.003 7	0.888 1	10.890 5	1.478 2
	COK	指数函数	0.207 7	9.391 9	0.002 3	0.879 0	10.848 5	1.456 6

表 3 验证集的 OK 和 COK 相对预测误差比较
Table 3 Comparison of relative tolerance of the validation set between Kriging and Cokriging

土壤养分	样本数	极小值(%)		极大值(%)		均值(%)	
		OK	COK	OK	COK	OK	COK
有机质	44	8.21	8.05	11.47	11.51	6.05	5.72
碱解氮	44	31.12	31.02	11.34	8.43	0.86	2.06
速效钾	44	108.26	50.31	8.21	16.38	22.30	19.36
有效磷	44	32.35	23.53	22.27	29.36	10.75	1.80

3.2.2 土壤养分空间分布特征分析 根据土壤养分制图精度研究结果,有机质、速效钾和有效磷采用 COK 进行空间内插,碱解氮采用 OK 方法进行养分制图,并利用自然断裂法分别把各养分指标的插值结果重新分级为 5 级(图 2)。从图 2 分析可知,有机质的空间分布格局为由骏马-阡东一线和建陵-昭陵一带向中部递减,其中含量 11.753~16.000 g/kg 占全部的 34.337%,含量高的阡东-骏马地区与土质好、坡度适宜和果园有机肥施用量有关,建陵和昭陵地区主要与地形条件和植被覆盖度有关;除南坊镇部分地区,赵镇、城关、药王洞和史德镇的东部为碱

解氮的高值区,分别向东、北和西南递减,72.847~134.000 mg/kg 含量地区仅占全区的 27.534%,含量高地区主要与水系分布和人工培肥的比例有关;速效钾的高值区主要分布在研究区南部,北部大多数地区钾含量偏低,其中 278.569~452.475 mg/kg 的养分含量所占比重为 38.461%,钾含量高的地区主要受土壤类型影响,因为南部地区大多分为褐土,其土类的平均钾含量偏高;有效磷的高值区主要分布在东南部的烽火镇和骏马镇、石潭-昭陵镇一线,24.180~49.800 mg/kg 养分含量仅占全区的 17.079%,这主要与当地的成土母质、磷肥施用情况有关。

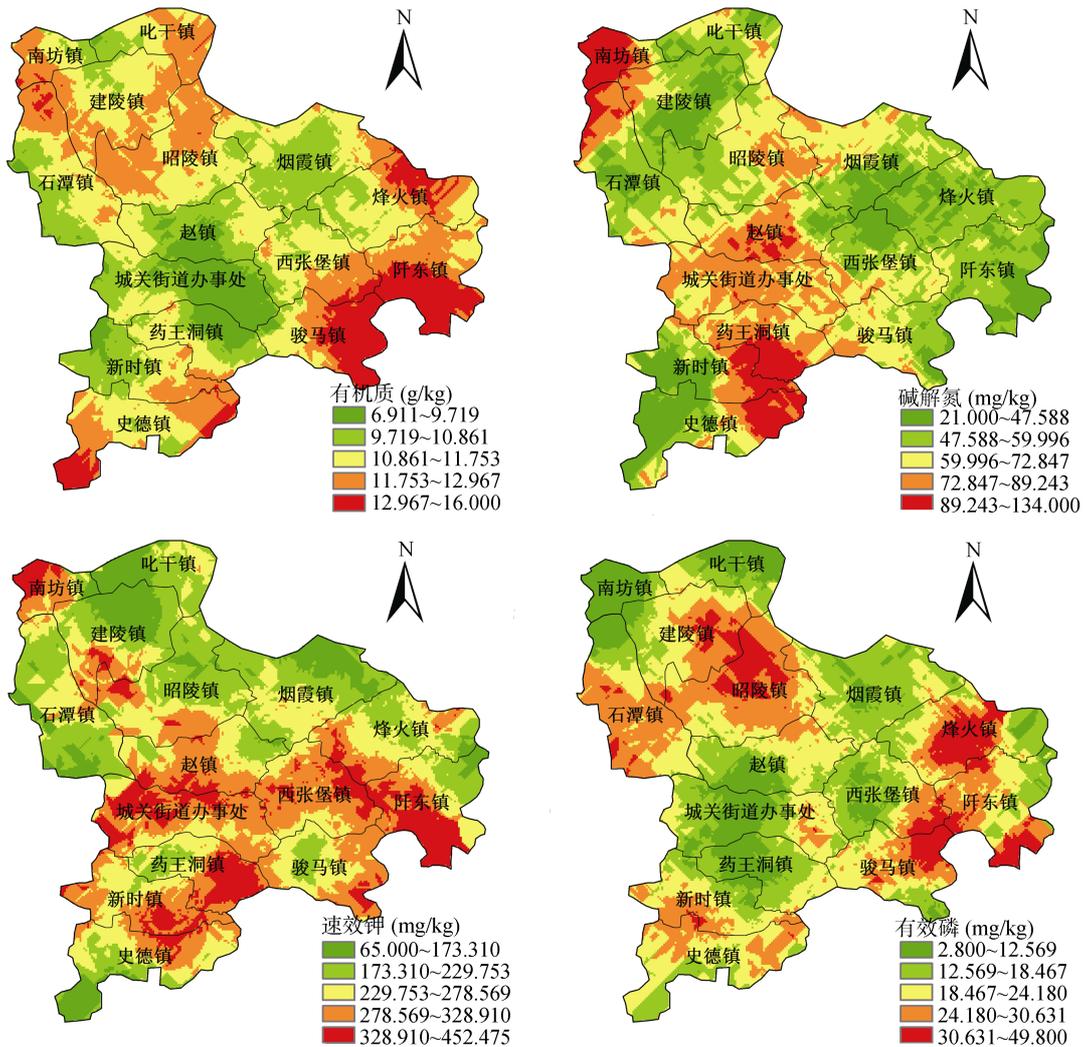


图 2 研究区土壤养分空间分布
Fig. 2 Spatial distributing of soil nutrients in studied area

3.3 土壤养分影响因素分析

3.3.1 相关性分析 通过 SPSS17.0 软件分别计算有机质、碱解氮、速效钾和有效磷与 5 类成土影响因子的 Pearson 相关系数。从表 4 分析可知,每项养分指标与成土影响因子均具有不同水平的空间

相关性。有机质与 H 在 $P<0.01$ 水平上呈显著相关,表明果园土壤有机质含量随着海拔变化而发生显著变化;有机质分别与 AS、SL 在 $P<0.05$ 水平上显著相关,由于坡向和坡度不同引起果园地处的水热环境差异,土壤腐殖质的分解度不同,除与 H 在 $P<0.05$

表 4 果园土壤养分与成土因子的相关系数
Table 4 Correlation coefficients between soil nutrients and soil-formation factors

	有机质	碱解氮	速效钾	有效磷
NDVI	-0.051	-0.149**	-0.067	0.082
ST	0.083	0.138**	0.103*	0.056
SL	0.112*	0.157**	0.140**	0.065
H	0.136**	0.107*	0.109*	0.116*
AS	0.115*	0.180**	0.198**	0.063

注: **, *分别代表在 $P<0.01$ 、 $P<0.05$ 水平上显著相关。

水平上显著相关外, 碱解氮与其余 4 类影响因子均在 $P<0.01$ 水平上显著相关, 与土壤类型相关程度高, 表明果园土壤中碱解氮含量大小受 NDVI、ST 和地形因子的影响; 速效钾含量与当地坡度、坡向具有显著相关性, 也较大程度受 ST 和 H 的影响; 有效磷与 H 在 $P<0.05$ 水平上显著相关, 与其余成土影响因子的相关性不显著, 与有效磷养分具有容易被固定特性、采样点位置和人类活动等有关。

表 5 土壤养分与成土影响因子的线性模型
Table 5 Linear models between soil nutrients and soil-formation factors

土壤养分	线性模型	模型参数		
		R^2	F	sig.
有机质	$y = 0.487H + 0.935SL + 0.528AS - 9.992$	0.043	4.296	0.006
碱解氮	$y = 0.781ST + 1.052AS + 0.909SL - 25.976NDVI + 0.921H - 159.025$	0.097	6.206	0.000
速效钾	$y = 1.01AS + 0.983SL + 0.369H + 0.453ST - 385.227$	0.068	5.284	0.000

4 讨论

研究区苹果园土壤养分含量的基本特征为有机质含量偏低, 这与高义民^[28]、张进等^[31]的研究成果及渭北旱塬有机质含量低的现状相吻合; 碱解氮含量与张丽娜等^[19]测定的果园氮素含量低相比, 该果区氮含量有所上升, 这与土壤类型的差异、测土配方施肥中果农加大了氮肥的施用量有关; 速效钾含量高, 表明其钾肥施用量过大, 应减少钾肥的人工培肥; 土壤有效磷的变异系数最大, 主要与苹果区磷肥施用不均有关。因此, 研究区苹果园应加大有机肥培肥, 合理调整氮肥、磷肥和钾肥的施用比例。通过一元二次多项式的拟合结果可知, 碱解氮和速效钾分别与苹果产量极显著、显著相关, 这与高义民等^[32]研究结果大致吻合, 仅影响程度的差异。采用 OK 和 COK 两种方法比较研究土壤养分的空间预测精度, 利用 6 类误差精度参数进行交叉验证, 并利用验证集的相对预测误差验证精度, 结果表明在最优变异函数模型下, 果区土壤有机质、速效钾和有效磷的 COK 空间内插方法精度更高, 碱解氮的

3.3.2 多元线性回归分析 根据上述的相关性分析, 选取与土壤养分相关性显著的成土影响因子, 利用 SPSS 软件进行多元线性回归分析。由于有效磷与成土影响因子的相关性不显著, 线性回归分析的差异性不显著, 本文仅建立土壤有机质、碱解氮和速效钾与相关性强的成土影响因子的线性模型。从表 5 可知, 3 类养分指标的线性模型的 R^2 均小于 0.5, 其值分别为 0.043、0.097 和 0.068, 这可能跟土壤属性、采样密度和作物类型等有关, 前人在土壤养分研究中也出现类似情况^[30]。线性模型的 F 值较大和 sig. 值接近 0, 表明养分指标与其因子线性关系显著, 模型符合数理统计规律。H、SL 和 AS 在有机质的拟合模型中系数分别为 0.487、0.935 和 0.528, 表明不同地形因子对有机质含量的影响程度不同; 碱解氮含量不仅受地形因子的影响, 而且受土壤类型和 NDVI 的影响; 速效钾主要受地形因子和土壤类型的影响, 其中坡度和坡向对果园速效钾含量影响大。

OK 预测精度优于 COK。分析空间插值方法对土壤养分预测的适应性, 可为绘制与实际情况相符、精度高的土壤养分空间分布图奠定基础。

在土壤养分空间分布特征及影响因素方面, 有机质的高值地区主要与土壤类型、植被覆盖、坡度大小和有机肥培肥等有关; 赵镇-史德镇一线的土壤碱解氮含量高, 主要与研究区水系分布、人工培肥有关, 而这与养分的化学特性密切相关, 其结论与李建辉等人^[29]的研究结果一致; 南部的速效钾含量高, 与土壤类型大多数为褐土有关; 有效磷含量高的地区, 与母质、磷肥的施用有关, 磷肥聚集在此地区。根据影响因素分析的结果表明, 本研究定量表征了三大类因子对土壤养分的影响程度, 结果表明土壤养分主要受地形因子和土壤类型的影响, 这与苹果树的生长特性有关。同时, 由于成土影响因子和土壤养分的复杂性, 模型拟合精度系数较低, 但与前人研究类似并符合数理统计规律。因此, 针对土壤养分数字制图和影响因素分析的不确定性, 从非线性、线性和地统计数字制图三个角度, 探讨多类空间预测模型的优劣及其对果区养分制图的适

应性，并提取更多种类和精度高的成土影响因子，可进一步客观、定量分析果区土壤养分的影响因素，这些都是未来需要研究的内容。

5 结论

1) 从地统计数字制图角度，通过交叉验证和相对预测误差精度评价，比较研究了OK和COK对果园4种土壤养分预测的精度及其适应性，确定最优预测模型，提出了苹果区土壤养分数字制图的科学方案，并选取与养分含量相关性强的因子，通过拟合多元线性回归模型，客观、定量化分析了土壤养分的影响因素。研究结果可为苹果区测土配方施肥提供技术和理论依据，为土壤养分空间变异研究提供新思路。

2) 苹果区土壤养分含量空间分布不均。根据陕西省渭北区苹果土壤养分丰缺分级情况，有机质、碱解氮、速效钾和有效磷分别属于偏低、适量、高量和适量，变异系数均在10%~100%，属于中等空间变异，因此，应该增施有机肥，调控氮磷钾肥比例。碱解氮和速效钾分别与苹果产量极显著、显著相关。

3) 在最优变异函数模型下，果区土壤有机质、速效钾和有效磷的COK空间内插方法精度更高，碱解氮的OK预测精度优于COK。有机质的空间分布格局为由骏马-阡东一线和建陵-昭陵一带向中部递减；赵镇至南部史德镇的东部为碱解氮的高值区，分别向东、北和西南递减；速效钾的高值区主要分布在研究区南部，北部大多数地区钾含量偏低；有效磷的高值区主要分布在东南角的烽火和骏马镇地区、石潭-昭陵镇一线。

4) 土壤养分与成土影响因子的相关性分析表明，有机质与地形因子具有显著相关性，碱解氮受NDVI、土壤类型和地形因子的影响，速效钾与当地坡度、坡向具有显著相关性，但有效磷与三大类因子的相关性不显著。线性回归分析表明，不同地形因子对有机质含量的影响程度不同，碱解氮受地形因子、土壤类型和NDVI的影响，坡度和坡向对果园速效钾含量影响大。

参考文献：

[1] 王宗明, 张柏, 宋开山, 等. 东北平原典型农业县农田土壤养分空间分布影响因素分析[J]. 水土保持学报, 2007, 21(2): 73-77

[2] 胡艳霞, 周连第, 魏长山, 等. 水源保护地土壤养分空间变异特征及其影响因素分析[J]. 土壤通报, 2013, 44(5): 1184-1191

[3] 张建杰, 李富忠, 胡克林, 等. 太原市农业土壤全氮和有机质的空间分布特征及其影响因素[J]. 生态学报, 2009, 29(6): 3163-3172

[4] 李翔, 潘瑜春, 赵春江, 等. 利用不同方法估测土壤有机质及其对采样数的敏感性分析[J]. 地理科学, 2007, 27(5): 689-694

[5] 张国平, 郭澎湃, 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

[6] 周睿, 潘贤章, 王昌坤, 等. 上海市城郊土壤有机质的时空变异特征及其影响因素[J]. 土壤, 2014, 46(3): 433-438

[7] 于洋, 赵业婷, 常庆瑞. 渭北台塬区耕地土壤速效养分时空变异特征[J]. 土壤学报, 2015, 52(6): 1251-1261

[8] 李润林, 姚艳敏, 唐鹏钦, 等. 县域耕地土壤锌含量的协同克里格插值及采样数量优化[J]. 土壤通报, 2013, 44(4): 830-838

[9] 黄安, 杨联安, 杜挺, 等. 基于主成分分析的土壤养分综合评价[J]. 干旱区研究, 2014, 31(5): 819-825

[10] Roger A, Libohova Z, Rossier N, et al. Spatial variability of soil phosphorus in the Fribourg canton, Switzerland[J]. Geoderma, 2014, 217(5): 26-36

[11] 张世文, 张立平, 叶回春, 等. 县域土壤质量数字制图方法比较[J]. 农业工程学报, 2013, 29(15): 254-262

[12] 宋金红, 吴景贵, 赵欣宇, 等. 基于TM数据的黑土有机质含量空间格局反演研究[J]. 土壤学报, 2015, 52(6): 1422-1429

[13] 王茵茵, 齐雁冰, 陈洋, 解飞. 基于多分辨率遥感数据与随机森林算法的土壤有机质预测研究[J]. 土壤学报, 2016, 53(2): 342-354

[14] 韩丹, 程先富, 谢金红, 等. 大别山区江子河流域土壤有机质的空间变异及其影响因素[J]. 土壤学报, 2012, 49(2): 403-408

[15] 邓欧平, 周稀, 黄萍萍, 等. 川中紫色丘区土壤养分空间分异与地形因子相关性研究[J]. 资源科学, 2013, 35(12): 2434-2443

[16] 吴昊. 秦岭山地松栎混交林土壤养分空间变异及其与地形因子的关系[J]. 自然资源学报, 2015, 30(5): 858-869

[17] 赵莉敏, 史学正, 黄耀, 等. 太湖地区表层土壤养分空间变异的影响因素研究[J]. 土壤, 2008, 40(6): 1008-1012

[18] 李以康, 张法伟, 林丽, 等. 不同植被被覆下温性草原土壤养分分异特征[J]. 生态学杂志, 2013, 32(7): 1710-1716

[19] 张丽娜, 李军, 范鹏, 等. 黄土高原典型苹果园地深层土壤氮磷钾养分含量与分布特征[J]. 生态学报, 2013, 33(6): 1907-1915

[20] 郭宏, 杜毅飞, 王海涛, 等. 黄土高原苹果园土壤和叶片养分状况分析——以陕西省黄陵县为例[J]. 土壤, 2015, 47(4): 682-689

[21] 董鲁浩, 李玉义, 逢焕成, 等. 不同土壤类型下长期施肥对土壤养分与小麦产量影响的比较研究[J]. 中国农业大学学报, 2010, 15(3): 22-28

[22] Gasch C K, Huzurbazar S V, Stahl P D. Description of vegetation and soil properties in sagebrush steppe following pipeline burial, reclamation, and recovery time[J]. Geoderma, 2016, 265(5): 19-26

- [23] 信忠保, 余新晓, 张满良, 等. 黄土高原丘陵沟壑区不同土地利用的土壤养分特征[J]. 干旱区研究, 2012, 29(3): 379-384
- [24] 黄安, 杨联安, 杜挺, 等. 基于多元成土因素的土壤有机质空间分布分析[J]. 干旱区地理, 2015, 38(5): 994-1003
- [25] 徐建华. 计量地理学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006
- [26] 周磊, 齐雁冰, 常庆瑞, 等. 县域耕地土壤速效钾空间预测方法的比较[J]. 西北农林科技大学学报: 自然科学版, 2012, 40(8): 193-199
- [27] 石淑芹, 曹祺文, 李正国, 等. 区域尺度土壤养分的协同克里格与普通克里格估值研究[J]. 干旱区资源与环境, 2014, 28(5): 109-114
- [28] 高义民. 陕西渭北苹果园土壤养分特征时空分析及施肥效应研究[D]. 陕西杨凌: 西北农林科技大学, 2013
- [29] 李建辉, 李晓秀, 张汪寿, 等. 基于地统计学的北运河下游土壤养分空间分布[J]. 地理科学, 2011, 31(8): 1001-1006
- [30] Umali B P, Oliver D P, Forrester S, et al. The effect of terrain and management on the spatial variability of soil properties in an apple orchard[J]. *Catena*, 2012, 93(2): 38-48
- [31] 张进, 吴发启, 张扬, 等. 渭北优质苹果种植区土壤养分调查与评价[J]. 西北农业学报, 2011, 20(1): 102-108
- [32] 高义民, 同延安, 路永莉, 等. 陕西渭北红富士苹果园土壤有效养分及长期施肥对产量的影响[J]. 园艺学报, 2013, 40(4): 613-622

Spatial Distribution of Soil Nutrients and Their Influential Factors in Apple Production Area: A Case Study of Liquan County, Shaanxi Province

ZHANG Bin¹, YANG Lian'an^{1*}, YANG Fenli², WANG Weidong³, YUAN Xiaoyu³,
ZHANG Linsen⁴, XIE Xianjian⁵, YANG Yucen¹, DU Ting¹

(1 College of Urban and Environmental Sciences, Northwest University, Xi'an 710127, China; 2 Xianyang Agricultural Science Research Academy, Xianyang, Shaanxi 712000; 3 Soil and Fertilization Station of Liquan County, Xianyang, Shaanxi 713200, China; 4 College of Horticulture, Northwest A & F University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 5 School of Geography and Resources Science, Neijiang Normal University, Neijiang, Sichuan 641000, China)

Abstract: The objective and quantitative analysis of spatial heterogeneity of soil nutrients and their influential factors can provide scientific basis for precision fertilization. Apple production area at Liquan County, Shaanxi Province was selected as the research area, soil samples at 0-40 cm depth were collected by the "S" shape sampling method, the mapping accuracies of soil nutrients including organic matter, alkali hydrolysable N, available K and available P were studied by geostatistics and GIS. The optimal prediction models were determined by cross-validation and relative tolerance, and spatial distribution maps of soil nutrients were drawn, the spatial distribution characteristics of soil nutrients were comprehensively analyzed. Moreover, influential factors of soil nutrients and their weights were decided by Pearson correlation and multiple regression analysis. The results showed that: 1) Under the optimal variogram model, the interpolation accuracy of Cokriging were better to predicate organic matter, available K and available P compared by Ordinary Kriging, while, Ordinary Kriging was better to predicate alkali hydrolysable N. 2) Soil organic matter showed a decrease trend from Junma Town-Qiandong Town, Jianling and Zhaoling Town to the middle part area; the high value area of hydrolysable N was from Zhao Town to the east of Shide Town, decreasing toward the east, north and southwest respectively; the high value area of available K was located in the south of the studying area; The high value area of available P was located among Fenghuo and Junma Town, Shitan-Zhaoling Town. 3) Soil organic matter and terrain factors were significantly correlated. Alkali hydrolysable N was affected by NDVI, soil types and terrain factors. Available K content was significantly correlated with slope and aspect, however, no significant correlation was found for available P.

Key words: Soil nutrients; Spatial distribution; Influencing factors; Cokriging; Multiple regression analysis; Liquan County