中国生态农业学报(中英文)
Chinese Journal of Eco-Agriculture
中文核心期刊
中国科技核心期刊
中国精品科技期刊
百种中国杰出学术期刊
中国科学引文数据库源刊

近40年来陕西省耕层土壤pH的时空变化特征

王洪，曹婧，毋俊华，陈怡平

引用本文:
王洪, 曹婧, 毋俊华, 等. 近40年来陕西省耕层土壤pH的时空变化特征[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2021, 29(6): 1117–1126.

在线阅读 View online: https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.200778

(向下翻页，阅读全文)

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

不同耕整地方式对甘蔗耕层结构特性及产量的影响

Effect of tillage mode on soil structure characteristics of plough layer and sugarcane yield

中国生态农业学报. 2018, 26(6): 824–836 https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.170918

玉米秸秆全量深翻还田对高产田土壤结构的影响

Effects of deep tillage and straw return on soil structure of high–yield spring maize field

中国生态农业学报. 2018, 26(4): 584–592 https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.170677

福建耕地土壤磷素富集空间差异及其影响因素

Spatial variation in phosphorus accumulation and the driving factors in cultivated lands in Fujian Province

中国生态农业学报. 2018, 26(2): 274–283 https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.170767

基于土地适宜性和固碳需求的紫云英种植布局研究:以福建省浦城县为例

Optimal arrangement of milk vetch plantation based on land suitability and carbon sequestration in croplands: A case study of Pucheng County, Fujian Province

中国生态农业学报. 2018, 26(1): 125–135 https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.170751

不同轮耕方式对渭北旱塬麦玉轮作田土壤物理性状与产量的影响

Effects of different rotational tillage patterns on soil physical properties and yield of winter wheat–spring maize rotation field in Weibei highland

中国生态农业学报. 2015(9): 1102–1111 https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.150175

中国生态农业学报(中英文) 2021 年 6 月 第 29 卷 第 6 期
Chinese Journal of Eco-Agriculture, Jun. 2021, 29(6): 1117−1126

DOI: 10.13930/j.cnki.cjea.200778

王洪, 曹婧, 毋俊华, 陈怡平. 近 40 年来陕西省耕层土壤 pH 的时空变化特征[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2021, 29(6): 1117−1126
WANG H, CAO J, WU J H, CHEN Y P. Spatial and temporal variability in soil pH of Shaanxi Province over the last 40 years[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2021, 29(6): 1117−1126

近 40 年来陕西省耕层土壤 pH 的时空变化特征*

王 洪[1,2], 曹 婧[1,2], 毋俊华[1,2], 陈怡平[1**]

(1. 中国科学院地球环境研究所/黄土与第四纪地质国家重点实验室 西安 710061; 2. 中国科学院大学 北京 100049)

摘 要: 以陕西省耕层土壤为研究对象, 利用 1980s 第 2 次土壤普查数据和 2017 年的 705 个样点分析数据, 基于地统计学和 ArcGIS 分析耕层土壤 pH 时空变化特征, 并采用相关分析和方差分析方法探讨其影响因素, 对于陕西农业可持续发展及生态环境保护具有极其重要的意义。结果表明, 陕北、关中及陕南地区耕层土壤 pH 均值依次为 8.25、7.91、6.25, 分别为弱碱性、弱碱性和弱酸性; 各行政区耕层土壤 pH 排列顺序为延安>榆林>铜川>咸阳>渭南>西安>宝鸡>商洛>安康>汉中。时间上, 与 1980s 相比, 陕北和关中耕层土壤呈碱化趋势, 陕南耕层土壤呈酸化趋势; 各行政区除榆林、安康、汉中和商洛耕层土壤呈酸化趋势, 其余各市耕层土壤均呈碱化趋势。空间上, 陕北和陕南耕层土壤 pH 拟合的最优半方差函数模型为线性模型, 关中耕层土壤 pH 拟合的最优半方差函数模型为高斯模型, 均表现出较强的空间相关性。陕北耕层土壤 pH 空间分布呈零星斑状特征, 关中和陕南耕层土壤 pH 空间分布呈东部高于西部特征。坡向、海拔与陕西省耕层土壤 pH 显著相关, 坡度越小, 海拔越高, pH 越大, 不同类型的土壤 pH 存在差异。建议陕北和关中地区防治土壤盐碱化问题, 陕南地区防治土壤酸化问题, 以促进农业可持续发展和保障区域粮食安全。

关键词: 陕西省; 耕层土壤 pH; 空间相关性; 地形; 土壤类型

中图分类号: S159.9 开放科学码(资源服务)标识码(OSID):

Spatial and temporal variability in soil pH of Shaanxi Province over the last 40 years*

WANG Hong[1,2], CAO Jing[1,2], WU Junhua[1,2], CHEN Yiping[1**]

(1. Institute of Earth Environment, Chinese Academy of Sciences / State Key Laboratory of Loess and Quaternary Geology, Xi'an 710061, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Rapid development of the economy has increased the occurrence of declining cultivated land quality, such as acidification and salinization in China. To provide a scientific basis for adjustment of topsoil pH and to realize the rational use of land resources in Shaanxi Province, this study examined pH of 705 topsoil samples from Shaanxi Province using a soil/water ratio of 2.5/1 in 2017 and incorporated soil pH data from the second national soil survey in 1980s. The spatio-temporal changes and classification characteristics were analyzed via ArcGIS, and the influencing factors were investigated by correlation analysis and analysis of variance methods. General statistical analysis and normality tests were performed in Excel 2016 and SPSS 22.0; and the GS+9.0 software was adopted to obtain the best fitting model. The ordinary Kriging method was used for spatial interpolation analysis and mapping. The study is important for sustainable agriculture development and ecological environment protection in Shaanxi Province. The results showed that pH values of farmland soil in north-

* 国家重点研发计划项目(2017YFD0800500)资助
** 通信作者: 陈怡平, 主要研究方向为生态学。E-mail: lifesci@ieecas.cn
王洪, 主要研究方向为土壤生态学。E-mail: wanghong@ieecas.cn
收稿日期: 2020-09-25 接受日期: 2021-03-20
* This study was supported by the National Key R & D Program of China (2017YFD0800500).
** Corresponding author, E-mail: lifesci@ieecas.cn
Received Sep. 25, 2020; accepted Mar. 20, 2021

ern Shaanxi, Guanzhong, and southern Shaanxi were 8.25, 7.91, and 6.25, respectively, and the corresponding levels were 5 (alkalescence), 5 (alkalescence), and 3 (weak acidity), respectively. The order of soil pH in the administrative regions was Yan'an > Yulin > Tongchua > Xianyang > Weinan > Xi'an > Baoji > Shangluo > Ankang > Hanzhong. The topsoil pH in Hanzhong City showed moderate variation, whereas the other cities in Shaanxi Province showed weak variation. Compared with the 1980s, the farmland soil in northern Shaanxi and Guanzhong showed an alkalization trend, whereas the surface soil in southern Shaanxi showed an acidification trend. In the administrative regions, the topsoil in Yulin, Ankang, Hanzhong, and Shangluo showed an acidification trend, and the soil in other cities showed an alkalization trend. The optimal fitting semi-variance function model of farmland soil pH in northern and southern Shaanxi was a linear model, and the optimal fitting semi-variance function model of farmland soil pH in Guanzhong was a Gaussian model; both showed strong spatial correlation. Furthermore, the topsoil pH in northern Shaanxi was primarily influenced by structural factors, whereas the topsoil pH in Guanzhong and southern Shaanxi was influenced by structural and random factors. The spatial distribution characteristics of topsoil pH were sporadic in northern Shaanxi, and that in Guanzhong and southern Shaanxi was higher in the east than in the west. Changes in soil pH were affected by natural and human factors, such as topography, soil type, climate, and fertilization. Slope and elevation were significantly (P<0.05) correlated with topsoil pH in Shaanxi Province; lower slopes and higher altitudes had higher soil pH. To promote sustainable agriculture development and regional food security, soil salinization should be prevented in northern Shaanxi and Guanzhong and acidification should be prevented in southern Shaanxi.

Keywords: Shaanxi Province; Topsoil pH; Spatial correlation; Topography; Soil type

我国人均耕地面积不足 0.093 hm^2，不但耕地面积少，而且地力低下[1]。随着经济的快速发展，我国耕地质量下降的问题日益凸显，呈现南酸化北盐碱。土壤 pH 是影响土壤质量的一个重要化学指标，不仅影响植物对土壤养分的吸收[2]，还影响土壤中 Cu、Zn、Fe、Mn 等金属元素的价态、迁移与转化[3]。研究发现土壤 pH 为 6.5~7.5 有利于作物对各种营养元素的吸收利用与生长发育[4]。pH 过低或过高都不利于养分吸收，易造成肥料浪费，使土壤失去耕种价值，例如过酸会引起土壤板结、土壤微生物数量减少、不利于有机物分解等问题。

原农业部测土配方施肥数据显示，与 30 年前相比，南方 14 省(区、市)土壤 pH 小于 6.5 的比例由 52%扩大至 65%，土壤 pH 小于 5.5 的比例由 20%扩大至 40%，土壤 pH 小于 4.5 的比例由 1%扩大至 4%[5]。我国盐渍化面积约 3460 万 hm^2，其中盐碱耕地面积 760 万 hm^2，近 20%耕地发生盐碱化[6]，尤其是西北地区，碱化面积 17.033 万 hm^2，盐渍化面积占全国耕地盐碱化面积的 27.19%。近年来，随着现代化农业的快速发展，3S 技术在农业中的应用也越来越广泛[7-8]，基于地统计学和 ArcGIS 的土壤 pH 的时空变异性逐渐成为研究的热点。如胡敏等[9]以第 2 次土壤普查和耕地质量评价两个不同时期湖北省恩施州土壤 pH 数据为基础，对恩施州耕地土壤 pH 近 30 年时空变化的研究表明，1983—2013 年恩施州土壤受肥料结构、配比变化及高产作物收获带走大量盐基养分等人为因素影响呈酸化趋势；张维等[10]应用地统计学方法，分析了四川省仁寿县表层土壤 pH 的空间变异特征，研究发现土地利用方式、成土母质和土壤类型是显著影响该区域土壤 pH 空间变异的因素；刘付程等[11]运用地统计学方法研究了 1980s—2000 年太湖流域典型区域土壤 pH 的时空变异特征，在化学肥料大量施用和工业污染物排放的影响下导致该区域土壤总体呈酸化趋势；李婷等[12]利用 1982 年和 2002 年两个时期数据分析成都平原土壤 pH 的时空变异特征，研究表明受成土母质、土地利用方式、施肥措施和工业发展的影响，成都平原土壤 pH 呈整体下降趋势。

陕西省作为我国古老农业的发祥地之一，也是重要的粮食生产基地。第 2 次土壤普查后陕西省耕层土壤 pH 空间分布的研究多局限于县域尺度，全省尺度的研究鲜有报道。此外，与前人研究[10-12]相比，本研究采用了 GS+与 ArcGIS 相结合的地统计方法获取精准的空间分布特征，且进行了空间尺度上和时间尺度上变化特征的双重研究，使得该研究更为全面科学。随着化学肥料的大量施用，在全国耕层土壤南酸化北盐碱的大背景下，南北跨度大、地形地貌复杂的陕西省耕层土壤 pH 时空如何变化？其变化主控因素是什么？这些问题都不清楚。为此，本文以陕西省为研究对象，探讨该区域耕地土壤 pH 的时空变异特征及其影响因素，旨在厘清全省土壤酸化碱化状况，为调节土壤酸碱度、合理利用土地资源提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

陕西省位于我国西北部内陆腹地(105°29′~111°15′E，31°42′~39°35′N)，南北长约 880 km，东西

宽约 160~490 km, 土地总面积占全国总面积的 2.14%。陕西省自北向南划分为陕北黄土高原、关中平原和陕南秦巴山区。陕北黄土高原海拔 900~1900 m, 约占全省面积的 45%; 关中平原海拔 460~850 m, 约占全省面积的 19%; 秦岭以南为秦巴山区, 海拔多在 1000~3000 m, 约占全省面积的 36%[13]。由于南北跨度大, 全省气候差异明显, 长城沿线以北为温带干旱半干旱气候, 陕北其余地区和关中平原为暖温带半干旱或半湿润气候, 陕南盆地为亚热带湿润气候, 山地多为暖温带湿润气候。全省年平均气温 7~16 ℃, 其中陕北 7~11 ℃, 关中 11~13 ℃, 陕南多在 14~15 ℃。陕西省是全国水资源最紧缺的省份之一, 外流河流域面积占全省面积的 97.7%。全省平均降水量 653 mm, 陕北水资源严重缺乏, 关中水资源短缺, 陕南水资源丰富。陕西省土地利用类型包括耕地、园地、草地、林地及建设用地等, 全省常用耕地面积为 3010.52×10^3 hm^2, 其中水田 138.23×10^3 hm^2, 水浇地 971.35×10^3 hm^2。全省共有 22 个土类, 49 个亚类, 134 个土属, 403 个土种。其中, 风沙土、黄绵土、塿土、水稻土、潮土、新积土、沼泽土、盐碱土等是陕西省的主要地域性土壤。

1.2　样品采集及测定

样品采集时间为 2016 年 10 月到 2017 年 3 月(秋收后播种前), 利用 GPS 记录研究区域内采样点的经纬度, 同时记录样点土壤类型和海拔高度, 每 10 km 设置一个面积为 10 m×10 m 的采样单元, 采用五点布局法取 0~20 cm 耕层土壤样品混匀, 并取 2 kg 混合土壤样品装入干净的塑封袋保存, 于 4 ℃条件下带回实验室保存作后续分析。共计采样 705 份, 其中陕北地区 258 份, 关中地区 211 份, 陕南地区 236 份。土壤采样点分布如图 1 所示。土壤样品经风干、研磨、去杂、过筛后, 采用 2.5∶1 水土比为浸提-pH 计法测定 pH[13]。

1.3　数据分析

数据来源: 坡度、海拔、坡向等地形因子数据借助 ArcGIS 10.2 从 DEM 图提取(DEM 数据来源于地理空间数据云网站 http://www.gscloud.cn/), 陕西省 1980s 土壤 pH 占比比例、分级标准、土壤类型均来自《陕西土壤》[14](表 1), 陕西省肥料施用量数据来自《陕西省统计年鉴》(http://tjj.shaanxi.gov.cn/tjsj/)(表 2)。

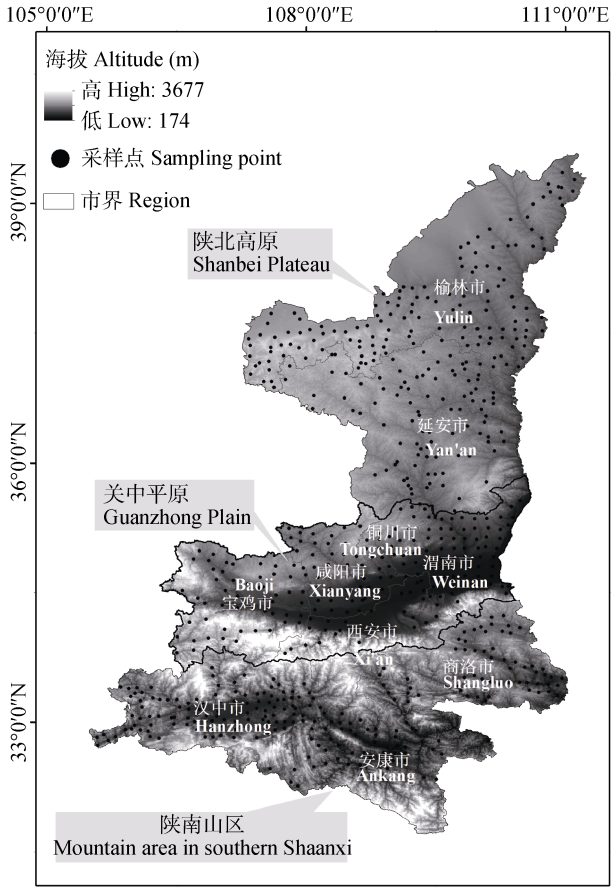

图 1　采样点地理位置
Fig. 1　Location of sampling points

采用 Excel 2016 和 SPSS 22.0 软件对数据进行常规统计分析和正态检验, 单因素方差分析(ANOVA)和皮尔森(Pearson)相关性分析均在 SPSS 22.0 中实现, 采用 GS+9.0 得出陕西省分区耕层土壤 pH 的最佳拟合理论模型, 采用 ArcGIS 10.2 全局墨兰指数(Moran's *I* 指数)进行空间自相关分析, 普通克里格(Ordinary Kriging)方法进行空间插值分析与制图。

表 1　陕西省土壤 pH 分级标准
Table 1　Grading standard of soil pH in Shaanxi Province

	强酸性 Strong acidity	酸性 Acidity	弱酸性 Weak acidity	中性 Neutral	弱碱性 Alkalescence	碱性 Alkalinity	强碱性 Strong basicity
等级 Level	1	2	3	4	5	6	7
pH	<4.5	4.6~5.5	5.6~6.5	6.6~7.5	7.6~8.5	8.6~9	>9.1

表 2 陕西省 1987—2017 年肥料用量

Table 2 Fertilizer application rates in Shaanxi Province during 1987−2017 ×10^4 t

年份 Year	氮肥 Nitrogen fertilizer	磷肥 Phosphate fertilizer	钾肥 Potassium fertilizer	复合肥 Compound fertilizer	化肥 Chemical fertilizer
1987	33.00	5.50	0.70	4.40	43.60
1990	48.60	10.10	2.30	6.90	67.90
2000	73.00	16.89	8.17	33.25	131.19
2010	87.67	17.98	19.99	54.63	196.79
2017	90.02	18.64	24.26	99.24	232.15

2 结果与分析

2.1 陕西省耕层土壤 pH 描述统计

陕北耕层土壤 pH 范围为 7.68~8.72，延安市耕层土壤 pH 显著高于榆林市(P<0.05)。关中耕层土壤 pH 范围为 6.85~8.81，铜川、渭南、咸阳之间的耕层土壤 pH 不存在显著性差异，但均显著高于宝鸡市耕层土壤 pH (P<0.05)。陕南耕层土壤 pH 范围为 4.3~7.79，各市耕层土壤 pH 排列顺序为商洛>安康>汉中，且均差异显著(P<0.05)。除汉中市耕层土壤 pH 呈中等程度变异外，陕西省其余各市变异系数均低于 10%，都表现为弱变异。依据陕西省土壤 pH 分级标准，陕北和关中地区各市耕层土壤 pH 均对应等级 5 级，土壤呈弱碱性；陕南地区的安康市和汉中市耕层土壤 pH 对应等级 3 级，土壤呈弱酸性，商洛市耕层土壤 pH 对应等级 4 级，呈中性(表 3)。

表 3 陕西省各市耕层土壤 pH 含量描述统计

Table 3 Description of soil pH in cities of Shaanxi Province

区域 Region	市 City	数量 Number	最小值 Minimum value	最大值 Maximum value	平均值 Mean	标准偏差 SD	变异系数 CV (%)	等级 Level
陕北 Shanbei	延安 Yan’an	101	7.90	8.72	8.32a	0.19	2.30	5
	榆林 Yulin	157	7.68	8.52	8.21b	0.16	1.90	5
	铜川 Tongchuan	20	7.68	8.37	8.12bc	0.2	2.50	5
关中 Guanzhong	渭南 Weinan	66	7.09	8.81	8.00c	0.35	4.30	5
	西安 Xi’an	22	6.85	8.65	7.91cd	0.43	5.40	5
	咸阳 Xianyang	46	7.77	8.29	8.03c	0.13	1.60	5
	宝鸡 Baoji	57	6.94	8.27	7.73d	0.27	3.50	5
陕南 Shannan	安康 Ankang	47	5.16	7.79	6.42f	0.61	9.50	3
	汉中 Hanzhong	127	4.30	6.98	6.00g	0.69	11.50	3
	商洛 Shangluo	62	5.37	7.51	6.64e	0.47	7.10	4

不同小写字母表示不同城市间差异显著(P<0.05)。Different lowercase letters mean significant differences among cities at P<0.05 level.

2.2 陕西省耕层土壤 pH 分级时间变化特征

2017 年陕北和关中地区各市的耕层土壤中弱碱性土面积占比最大，陕南地区汉中市耕层土壤的弱酸性土面积占比最大，这一分级面积占比结果与 1980s 时期第 2 次土壤普查规律一致；2017 年陕南地区安康市和商洛市的耕层土壤中面积占比最大的均为中性土，但 1980s 时期安康市弱酸性土面积占比最大，商洛市弱碱性土面积占比最大(图 2)。1980s—2017 年陕西省各市耕层土壤 pH 分级占比均存在不同程度的变幅。与 1980s 相比，2017 年榆林市弱碱性土和碱性土比例分别下降 1.6%和 2.5%，中性土增加 4.1%，耕层土壤 pH 整体上变幅不大，呈现碱性减弱的趋势。延安市碱性土比例上涨 16.7%，而弱碱性土与中性土占比均下降，耕层土壤 pH 整体上变幅较大，呈现碱性增强的趋势。铜川市和咸阳市中性土比例分别下降 5.3%和 1.5%，弱碱性土比例分别上升 5.3%和 1.8%。渭南市弱酸性土面积占比下降 6.2%，而中性土、弱碱性土和碱性土占比涨幅依次为 4.5%、0.9%和 0.8%。西安市弱酸性土占比下降 8.5%，宝鸡市弱酸性土占比下降 23.4%。关中各市耕层土壤都呈碱性增强的趋势，此外，除宝鸡市外，其余各市的耕层土壤 pH 变幅都较小。商洛市中性土占比涨幅为 48.1%，弱碱性土占比下降 39.6%；安康市弱酸性土占比涨幅为 23.4%，中性土和弱碱性土占比分别下降 8.2%、12.2%。汉中市酸性土占比涨幅为 22.2%，弱碱性土占比下降 13.1%。陕南各市耕层土壤均呈酸性增强的趋势，且变幅都较大。

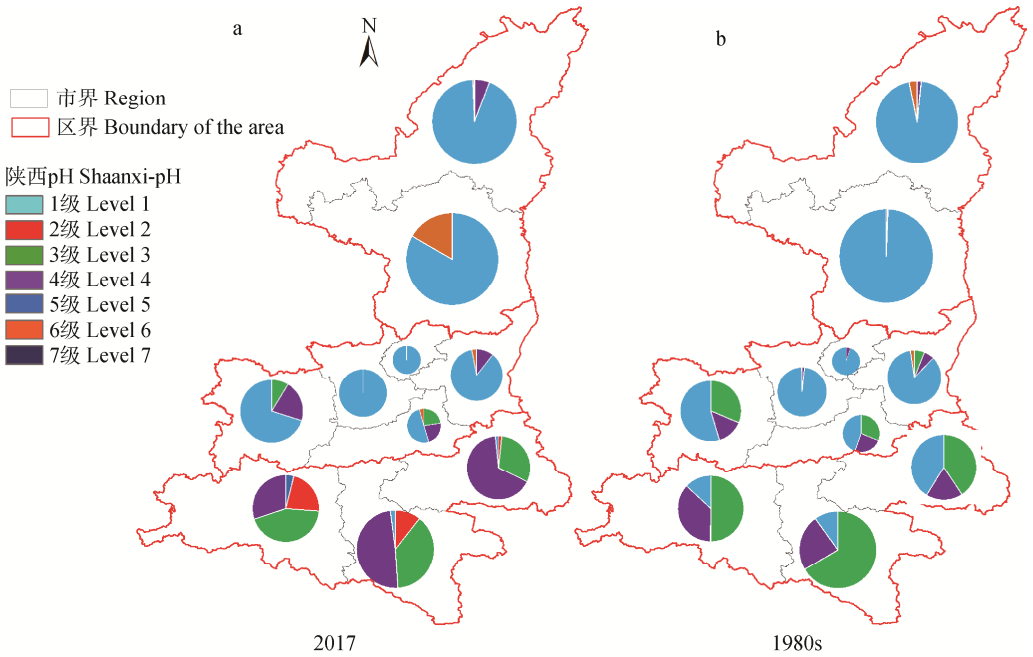

图 2　1980s 和 2017 年陕西省耕层土壤 pH 分级占比特征

Fig. 2　Fractional proportion characteristics of topsoil pH in Shaanxi Province in 2017 and 1980s

2.3　陕西省耕层土壤 pH 空间分布特征

变量具有空间自相关性是地统计插值的前提条件，陕北、关中和陕南地区耕层土壤 pH 的 Z 得分分别为 3.437、7.817 和 14.257，对应概率 P 均小于 0.01，说明陕北、关中及陕南地区耕层土壤 pH 都具有极强的空间聚集性。此外，三者对应的莫兰指数均为正数，说明 3 个地区耕层土壤 pH 均具有空间正相关性(表 4)。

借助 GS+软件精确计算和比较各个半变异函数模型，从而选出最适宜的模型用于插值分析。结果表明，陕北和陕南耕层土壤 pH 的最佳拟合模型为线性模型，关中为高斯模型，三者残差均接近于 0，拟合优度 R^2 接近 1，表明该函数拟合效果较好。关中和陕南地区耕层土壤 pH 块金系数为 25%~75%，表现为中等强度的空间相关性，说明关中和陕南耕层土壤 pH 同时受结构性因素和随机因素的双重影响，陕北地区耕层土壤 pH 块金系数低于 25%，说明该地区空间相关性较强，结构性因素占主导(表 5)。

表 4　陕西省耕层土壤 pH 空间自相关性检验

Table 4　Test of soil pH autocorrelation in Shaanxi Province

区域 Area	莫兰指数 Moran's I	预期指数 Expect I	方差 Variance	Z	P
陕北 Shanbei	0.073	−0.004	0.001	3.437	0.001
关中 Guanzhong	0.331	−0.005	0.002	7.817	0.000
陕南 Shannan	0.230	−0.004	0.000	14.257	0.000

表 5　陕西省耕层土壤 pH 最优半变异模型及相应参数

Table 5　Semivariogram models and relative parameters of soil pH in Shaanxi Province

区域 Area	模型 Model	块金值 C_0	基台值 C_0+C	块金系数 $C_0/(C_0+C)$	变程 Range (km)	残差 Residual error	拟合优度 R^2
陕北 Shanbei	线型 Linear	0.030	0.033	0.103	217.96	2.79E-05	0.86
关中 Guanzhong	高斯 Gussian	0.066	0.196	0.661	428.68	2.98E-04	0.96
陕南 Shannan	线型 Linear	0.339	0.535	0.365	245.55	0.0136	0.80

陕北地区耕层土壤 pH 整体呈零星斑状分布，榆林市南部耕层土壤 pH 整体低于北部，其中榆阳区东北部、神木县及府谷县耕层土壤 pH 偏高，而米脂县、佳县、子洲县及定边县耕层土壤 pH 相比其他县域较低。延安市耕层土壤 pH 整体偏高，子长县、安塞县、黄陵县、延川县、延长县及宝塔区耕层土壤 pH 最高，而洛川县、黄龙县、甘泉县及富县东部区域耕层土壤 pH 偏低(图 3a)。陕北地区各市下属所有区县耕层土壤 pH 均值都在 7.5~8.5 范围内，呈弱碱性。关中地区耕层土壤 pH 整体呈西部低于东部的特点，西安市南部耕层土壤 pH 整体低于北部，蓝田县、长安区、户县及周至县土壤 pH 较低。宝鸡市麟游县、岐山县及

凤翔县局部耕层土壤 pH 较高，铜川耕层土壤整体偏高，咸阳市旬邑县及武功县土壤 pH 较低，渭南市蒲城县、韩城、华阴、潼关等区域耕层土壤 pH 较低(图 3b)。关中地区各市下属大多区县耕层土壤都呈弱碱性，仅渭南市(潼关县)、西安市(周至县、蓝田县)、宝鸡市(眉县、太白县、凤县、陈仓区和陇县)县域土壤呈中性。陕南地区耕层土壤 pH 整体上东部高于西部，商洛市东北部(洛南县、商州区、丹凤县)耕层土壤 pH 较西南区域偏低，安康市西部土壤 pH 低于东部，汉中市耕层土壤 pH 自西向东先减后增(图 3c)。陕南地区各市下属大多区县耕层土壤 pH 均值都在 5.5~6.5 范围内，呈弱酸性，其中安康市(平利县、旬阳县)、汉中市(佛坪县)、商洛市(商南县、山阳县、镇安县)县域土壤呈中性，汉中市(勉县)土壤呈酸性。

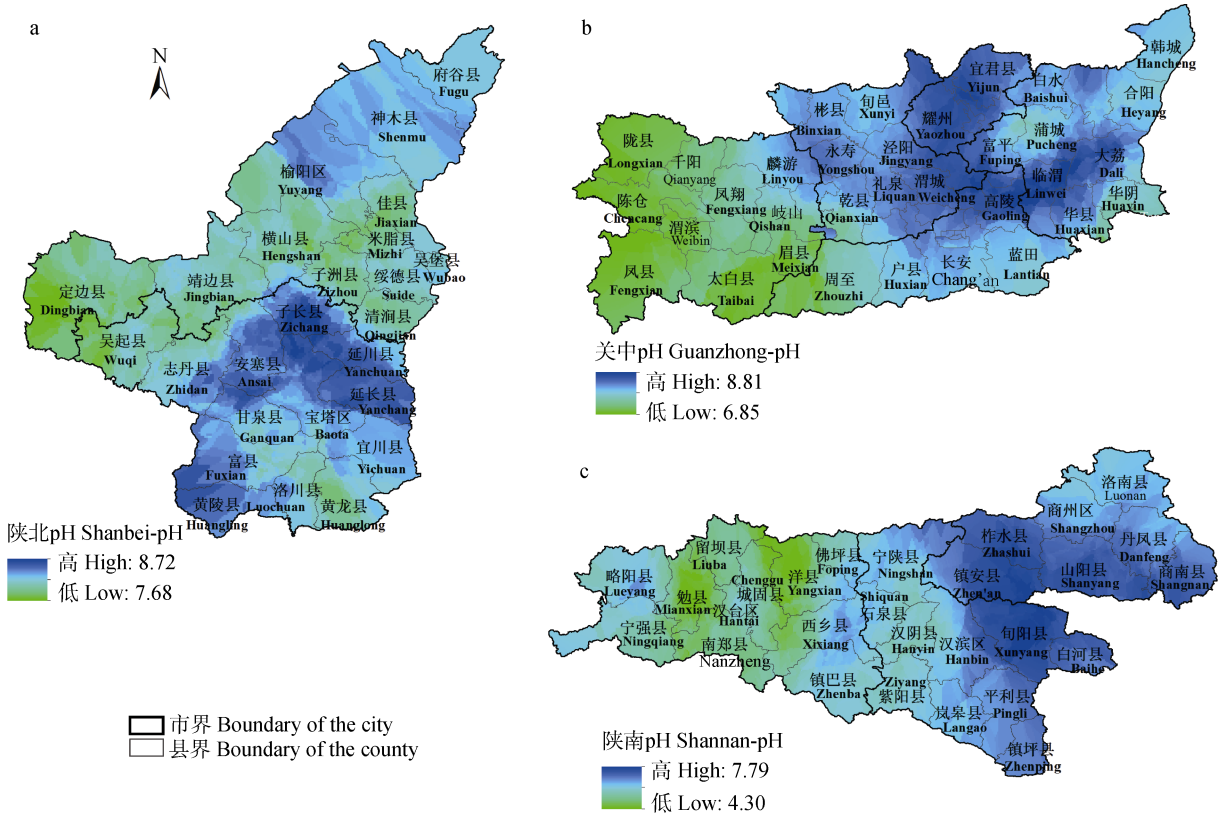

图 3 陕西省陕北(a)、关中(b)和陕南(c)耕层土壤 pH 空间分布特征

Fig. 3 Spatial distribution characteristics of topsoil pH in Shanbei (a), Guanzhong (b) and Shannan (c) areas of Shaanxi Province

2.4 陕西省耕层土壤 pH 的影响因素

坡度可以通过改变成土物质与水热条件的再分配，从而引起土壤理化性质的时空变异。陕西省Ⅴ级坡度(>25°)耕地面积最大，各级坡度土壤 pH 变异系数均大于 10%，属于中等变异。Ⅰ级坡度耕地土壤呈弱碱性，其余均呈中性。安康市平均坡度最大，渭南市平均坡度最小(表 6)。方差分析结果表明，Ⅱ级、Ⅲ级、Ⅳ级坡度土壤 pH 差异不显著，其余均有显著性差异(P<0.05)。Pearson 相关分析表明(表 7)，耕层土壤 pH 与坡度显著负相关，随着坡度的增加，pH 减小，与前人研究结论一致[15]。

表 6 陕西省不同土壤类型耕地土壤 pH 含量变化特征

Table 6 Statistical characteristics of soil pH in different soil types

坡度分级 Level of slope	样本数 Number	最小值 Minimum value	最大值 Maximum value	平均数 Mean	标准偏差 SD	变异系数 CV (%)	酸碱度 Acidity-basicity
Ⅰ级 Level 1	88	3.88	8.81	7.87a	0.79	10.1	弱碱性 Alkalescence
Ⅱ级 Level 2	146	4.53	8.67	7.48b	0.97	13.0	中性 Neutral
Ⅲ级 Level 3	169	4.31	8.66	7.50b	1.04	13.9	中性 Neutral
Ⅳ级 Level 4	128	4.46	8.65	7.43b	1.07	14.4	中性 Neutral
Ⅴ级 Level 5	173	4.07	8.72	7.13c	1.01	14.2	中性 Neutral

不同小写字母表示不同坡度间差异显著(P<0.05)。Different lowercase letters mean significant differences among different levels of slope at P<0.05 level.

海拔高度对耕地土壤理化性质也有着非常重要的影响, 主要通过温度、光、水、热以及母岩影响土壤的发育[16]。陕西省各地貌类型中, 秦岭山地区平均海拔最高, 关中地区平均海拔最低, 陕北地区介于二者之间。Pearson 相关分析表明(表 7), 耕层土壤 pH 与海拔显著正相关, 随着海拔高度的升高, 土壤 pH 呈上升趋势, 与王艳艳等[17]结论一致。陕西省平均海拔 1127 m, 全省平均海拔最高为宝鸡市, 约为 1351 m, 平均海拔最低的是渭南市, 约为 675 m。海拔 800 m 以下土壤 pH 呈中性, 800 m 以上都呈弱碱性。海拔 1000 m 以下呈中等变异, 1000 m 以上变异系数低于 10%, 呈弱变异(表 8)。方差分析结果表明, 在 1000~1200 m 与>1200 m 海拔梯度的土壤 pH 显著高于其余海拔梯度(P<0.05)。

表 7　陕西省耕层土壤 pH 与地形因子的相关分析
Table 7　Correlation analysis of soil pH and topographic factors in Shaanxi Province

	坡向 Aspect	坡度 Slope	海拔 Attitude
pH	0.032	−0.231**	0.453**

: 相关性在 0.01 尾上显著(双尾)。: significant correlation at P<0.01 level (double tail).

表 8　陕西省不同海拔梯度耕地土壤 pH 变化特征
Table 8　Statistical characteristics of soil pH in different altitude gradients

海拔梯度 Altitude gradient (m)	样本数 Number	最小值 Minimum value	最大值 Maximum value	平均数 Mean	标准偏差 SD	变异系数 CV (%)	酸碱度 Acidity-basicity
<500	110	5.39	8.81	7.32b	0.90	12.2	中性 Neutral
500~800	212	3.88	8.40	6.68c	1.02	15.2	中性 Neutral
800~1000	118	4.30	8.72	7.52b	1.03	13.7	弱碱性 Alkalescence
1000~1200	131	4.07	8.67	8.08a	0.55	6.8	弱碱性 Alkalescence
>1200	133	6.13	8.65	8.03a	0.50	6.2	弱碱性 Alkalescence

不同小写字母表示不同海拔梯度间差异显著(P<0.05)。Different lowercase letters mean significant differences among different altitude gradients at P<0.05 level.

不同的土壤类型对酸化的缓冲能力不同, 如氧化铁含量低的黄棕壤对酸的抑制能力较弱。陕西土壤种类众多, 共有 17 种典型土壤类型, 不同土壤类型 pH 值存在差异(表 9), 这主要取决于其成土母质。pH 由大到小排列顺序为: 风沙土>黄绵土>黑垆土>塿土>新积土>潮土>珊瑚砂土>石质土>粗骨土>褐土>棕壤>水稻土>紫色土>黄褐土>黄棕壤>沼泽土。其中风沙土、风沙土、黄绵土、黑垆土、塿土、新积土、潮土、珊瑚砂土 pH 均值分布为 7.5~8.5, 呈弱碱性; 粗骨土、褐土、棕壤、水稻土 pH 均值分布为 6.5~7.5, 呈中性; 紫色土、黄褐土、黄棕壤、沼泽土 pH 均值分布为 5.5~6.5, 呈弱酸性。从变异程度来看, 沼泽土、粗骨土、石质土、珊瑚砂土、黄棕壤和褐土表现为中等程度的空间变异性, 而其余土壤类型 pH 变异系数在 10%~100%范围内, 为弱变异性。

表 9　陕西省不同土壤类型耕地土壤 pH 含量变化特征
Table 9　Statistical characteristics of soil pH in different soil types

土壤类型 Soil type	样本数 Number	最小值 Minimum value	最大值 Maximum value	平均数 Mean	标准偏差 SD	变异系数 CV (%)	酸碱度 Acidity-basicity
棕壤 Brown earth	7	6.13	7.67	6.88	0.66	9.50	中性 Neutral
沼泽土 Swamp soil	18	3.88	7.68	5.83	0.99	16.90	弱酸性 Weak acid
黄褐土 Yellow cinnamon soil	42	5.14	7.79	6.36	0.59	9.40	弱酸性 Weak acid
黑垆土 Black lossial soil	23	7.71	8.48	8.09	0.18	2.20	弱碱性 Alkalescence
新积土 Newly deposited soil	69	5.67	8.67	7.94	0.59	7.40	弱碱性 Alkalescence
塿土 Tier soil	63	5.92	8.81	7.95	0.48	6.00	弱碱性 Alkalescence
紫色土 Purple soil	3	5.88	7.12	6.46	0.62	9.70	弱酸性 Weak acid
粗骨土 Coarse bone soil	30	4.07	8.44	7.01	1.05	15.00	中性 Neutral
石质土 Stony soil	3	6.15	8.39	7.47	1.17	15.70	中性 Neutral
水稻土 Paddy soil	5	5.96	6.84	6.50	0.33	5.10	中性 Neutral
珊瑚砂土 Coral soil	39	5.44	8.65	7.66	0.83	10.80	弱碱性 Alkalescence
黄棕壤 Yellow brown soil	112	4.30	7.51	6.14	0.73	12.00	弱酸性 Weak acid
黄绵土 Loessial soil	206	6.01	8.72	8.13	0.33	4.00	弱碱性 Alkalescence
褐土 Cinnamon soil	23	5.37	8.31	6.91	0.89	12.90	中性 Neutral
潮土 Fluvo soil	10	6.10	8.47	7.87	0.75	9.60	弱碱性 Alkalescencee
风沙土 Aeolian soil	18	7.92	8.52	8.26	0.15	1.80	弱碱性 Alkalescence

3 讨论

本研究结果表明陕西省耕层土壤 pH 整体呈北部高于南部的空间分布特征，这一特征与中国土壤“南酸北碱，沿海偏酸，内陆偏碱”的长期形成与发育规律一致。土壤 pH 的变化通常受自然因素和人为因素的双重影响[18-19]。陕北地区耕层土壤 pH 主要受结构性因素，如成土母质、土壤类型、地形因子等的影响较大，该区域以石灰性土壤为主，缓冲容量较强的碳酸盐是主要的 pH 的缓冲体系，pH 本底值较高。榆林市北部位于风沙区，土壤类型主要为风沙土，土质疏松，土壤风化侵蚀严重，肥力低下，导致榆林市耕层土壤 pH 北部高于南部。陕南和关中地区耕层土壤 pH 受结构性因素和随机因素的双重影响，塿土和褐土是关中主要的农业土壤，塿土耕种历史最久、有机肥施用最多，经过长期耕种，缓冲能力变大，一定程度上可以有效抑制土壤酸化。黄褐土、黄棕壤为陕南主要土壤类型，pH 本底值较低，氧化铁含量低的黄棕壤对酸的抑制能力较弱[20]，该区域土壤易酸化。另外，陕西省降水量由南向北递减，陕南为多雨地区，陕北降雨最少，当降雨量大于蒸发量时，土壤淋溶作用增强，土壤溶液中的交换性盐基阳离子极易下渗，盐基饱和度下降，H^+取而代之，酸碱平衡会遭到破坏，如常年降雨量较大的陕南地区土壤 pH 较低[21-22]；当降雨量小于蒸发量时，盐基阳离子富集于土壤表面，易造成土壤盐碱化[23]，如降雨量较小的陕北地区耕层土壤 pH 较高。

近 40 年来陕西省耕层土壤整体上呈酸化趋势，陕南耕层土壤呈酸化趋势。pH 每变化 1 个单位往往需要非常漫长的时间，所以较短时间内 pH 的剧烈变化主要受人为因素的干扰。Guo 等[24]研究表明，中国农田土壤 pH 在 1990—2000 年期间下降了 0.13~0.80 个单位，尤其是 20 世纪 90 年代有加速下降的趋势，与本研究陕西省耕层土壤整体酸化这一结果吻合。1987—2017 年陕西省氮磷钾肥施用量呈逐年增加趋势，2017 年陕西省化肥施用量是 1987 年的 5.32 倍(表 2)，化学肥料的施用是引起土壤酸化的重要原因之一[24]。氮磷钾肥投入比例严重失调，偏施氮磷肥，忽视钙、镁等碱性元素及微量元素的施用也会导致土壤 pH 发生改变；盲目施肥，长期施用硫基和氯基复合肥料，导致土壤 pH 降低，引起土壤酸化；大量使用化学肥料，忽视了有机肥的施用，造成土壤有机质减少，缓冲能力降低，导致耕地土壤向酸性方向发展[25]。其中铵态氮肥的施用是加速土壤酸化的重要原因，施入土壤中的铵离子会通过硝化反应释放出大量氢离子[21]。另外，本研究发现陕北和关中耕层土壤呈碱化趋势，据农业农村部耕地质量检测保护中心统计结果表明，近 10 年酸性土壤的占比均有所下降，这一结论与本研究结果吻合[26]。众多研究表明秸秆还田可以改良土壤酸度[27-30]，因为秸秆收获时带走大量的碱性物质。秸秆还田不仅可以直接缓解土壤酸化程度，还可以增加土壤养分和有机质含量、提高土壤缓冲性能，进而间接缓解土壤酸化。此前，为了解决耕地生产力低与人口不断增加的供需矛盾，陕西省通过增加复种指数及大量推广高产品种增加粮食产量，导致土壤中钾、钙、镁等矿质离子过度消耗[31]。近年来，陕西省多数地区开始推广秸秆还田，同时全面实施测土配方技术，积极响应化肥零增长方案，施肥虽然仍以氮磷钾肥为主，但有机肥比例也大幅增加，矿质离子得到有效的补充，土壤养分均衡，土壤酸化程度得到明显改善。

4 结论

陕北耕层土壤 pH 呈零星斑状空间分布，主要为弱碱性土，与 1980s 相比，土壤呈碱化趋势；关中耕层土壤 pH 空间分布特征为东部高于西部，主要为弱碱性土，与 1980s 相比，土壤呈碱化趋势；陕南耕层土壤 pH 空间分布特征为东部高于西部，中性土和弱酸性土占比最大，与 1980s 相比，土壤呈酸化趋势；陕西省耕层土壤 pH 整体呈北部高于南部的空间分布特征，弱碱性土占比最大，与 1980s 相比，土壤呈酸化趋势。建议陕北和关中地区应当有效防治土壤盐碱化，陕南地区应当积极应对土壤酸化问题。

陕西省土壤 pH 的时空变化受到地形因子、土壤类型、气候、施肥等自然因素和人为因素的共同影响。土壤呈酸化趋势的陕南地区可以通过增加有机肥施用量、秸秆还田、选择合适的氮肥品种(尿素和硝酸铵)、施用碱性改良剂、多种植豆科类植物等系列措施缓解土壤酸化的进程。土壤呈碱化趋势的陕北和关中地区可以通过选择合适的灌溉方式、种植耐盐耐碱作物、植树造林、施用化学改良剂(石膏和亚硫酸钙)等措施改善土壤碱化现状。

参考文献 References

[1] 林英. 我国耕地面积人均不足 1.4 亩[J]. 经济研究参考, 2007, (36): 27
LIN Y. The arable land per capita in China is less than 1.4 mu[J]. Review of Economic Research, 2007, (36): 27

[2] 邹晓锦，仇荣亮，黄穗虹，等. 广东大宝山复合污染土壤的

改良及植物复垦[J]. 中国环境科学, 2008, 28(9): 775–780
ZOU X J, QIU R L, HUANG S H, et al. Immobilization and re-vegetation of heavy metal polluted soils in Dabao Mountain, Guangdong Province by amendments[J]. China Environmental Science, 2008, 28(9): 775–780

[3] ESPAÑA J S, PAMO E L, PASTOR E S, et al. The removal of dissolved metals by hydroxysulphate precipitates during oxidation and neutralization of acid mine waters, Iberian pyrite belt[J]. Aquatic Geochemistry, 2006, 12(3): 269–298

[4] 唐琨, 朱伟文, 周文新, 等. 土壤 pH 对植物生长发育影响的研究进展[J]. 作物研究, 2013, 27(2): 207–212
TANG K, ZHU W W, ZHOU W X, et al. Research progress on effects of soil pH on plant growth and development[J]. Crop Research, 2013, 27(2): 207–212

[5] 江宜航. 耕地现状调查:我国耕地质量现状堪忧[EB/OL]. 中国社会科学网. [2020-9-21]. http://www.cssn.cn/dybg/201409/t20140927_1345037.shtml
JIANG Y H. Investigation on the status of cultivated land: The quality of cultivated land in China is worrying[EB/OL]. China Social Sciences Network. [2020-9-21]. http://www.cssn.cn/dybg/201409/t20140927_1345037.shtml

[6] 周和平, 张立新, 禹锋, 等. 我国盐碱地改良技术综述及展望[J]. 现代农业科技, 2007, (11): 159–161
ZHOU H P, ZHANG L X, YU F, et al. Review and prospect of saline-alkali land improvement technology in China[J]. Anhui Agriculture, 2007, (11): 159–161

[7] LIU Y, GAO P, ZHANG L Y, et al. Spatial heterogeneity distribution of soil total nitrogen and total phosphorus in the Yaoxiang watershed in a hilly area of Northern China based on geographic information system and geostatistics[J]. Ecology and Evolution, 2016, 6(19): 6807–6816

[8] HU C, LI F, XIE Y H, et al. Spatial distribution and stoichiometry of soil carbon, nitrogen and phosphorus along an elevation gradient in a wetland in China[J]. European Journal of Soil Science, 2019: ejss.12821 DOI: 10.1111/ejss.12821

[9] 胡敏, 向永生, 张智, 等. 恩施州耕地土壤 pH 近 30 年变化特征[J]. 应用生态学报, 2017, 28(4): 1289–1297
HU M, XIANG Y S, ZHANG Z, et al. Variation characteristics of farmland soil pH in the past 30 years of Enshi Autonomous Prefecture, Hubei, China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2017, 28(4): 1289–1297

[10] 张维, 李启权, 王昌全, 等. 川中丘陵县域土壤 pH 空间变异及影响因素分析——以四川仁寿县为例[J]. 长江流域资源与环境, 2015, 24(7): 1192–1199
ZHANG W, LI Q Q, WANG C Q, et al. Spatial variability of soil pH and its influence factors at a county scale in hilly area of mid-Sichuan basin—A case study from Renshou in Sichuan[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2015, 24(7): 1192–1199

[11] 刘付程, 史学正, 于东升. 近 20 年来太湖流域典型地区土壤酸度的时空变异特征[J]. 长江流域资源与环境, 2006, 15(6): 740–744
LIU F C, SHI X Z, YU D S. Spatial and temporal variability of soil acidity in typical areas of Taihu Lake Region in the last 20 years[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2006, 15(6): 740–744

[12] 李婷, 张世熔, 干文芝. 成都平原土壤 pH 的时空分布特征及影响因素研究[J]. 四川农业大学学报, 2006, 24(3): 313–318
LI T, ZHANG S R, GAN W Z. Temporal-spatial distribution characteristics and influence factors of soil pH in the Chengdu Plain[J]. Journal of Sichuan Agricultural University, 2006, 24(3): 313–318

[13] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 1999: 12–14
LU R K. Analitical Methods of Soil Agricultural Chemistry[M]. Beijing: China Agricultural Science Press, 1999: 12–14

[14] 郭兆元. 陕西土壤[M]. 第 1 版. 北京: 科学出版社, 1992: 13–18
GUO Z Y. Soil in Shaanxi Province[M]. 1st ed. Beijing: Science Press, 1992: 13–18

[15] 雷宝佳. 农耕区土壤养分空间变异及其影响因素分析——以陕西周至县为例[D]. 西安: 西北大学, 2014
LEI B J. Analysis of spatial variation of soil nutrient and its influencing factors in farming area[D]. Xi'an: Northwest University, 2014

[16] 梁涛, 高兴仁, 徐毅丹, 等. 重庆 2 个区土壤养分状况与海拔高度关系分析[J]. 南方农业, 2015, 9(1): 28–30
LIANG T, GAO X R, XU Y D, et al. Relationship between soil nutrient status and altitude in two regions of Chongqing[J]. South China Agriculture, 2015, 9(1): 28–30

[17] 王艳艳, 赵伟明, 赵科理, 等. 海拔高度对山核桃林地土壤 pH 值和有效养分的影响[J]. 现代农业科技, 2012, (17): 224–225, 231
WANG Y Y, ZHAO W M, ZHAO K L, et al. Effects of altitude on pH value and available nutrients in Chinese hickory orchards[J]. Modern Agricultural Sciences and Technology, 2012, (17): 224–225, 231

[18] 史利江, 郑丽波, 柳云龙, 等. 长三角地区农田土壤养分空间变异及养分综合评价[J]. 长江流域资源与环境, 2008, 17(6): 839–846
SHI L J, ZHENG L B, LIU Y L, et al. Research on the characteristics of spatial variability of soil nutrients and general assessment in farm and in the Yangtze River Delta[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2008, 17(6): 839–846

[19] 刘欣, 王红梅, 廖丽君. 黑龙江省巴彦县土壤养分空间变异规律与格局分析[J]. 土壤通报, 2011, 42(1): 86–90
LIU X, WANG H M, LIAO L J. Spatial variability and pattern analysis of soil nutrients in Bayan of Heilongjiang Province[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2011, 42(1): 86–90

[20] 徐仁扣, Coventry D R. 某些农业措施对土壤酸化的影响[J]. 农业环境保护, 2002, 21(5): 385–388
XU R K, COVENTRY D R. Soil acidification as influenced by some agricultural practices[J]. Agro-Environmental Protection, 2002, 21(5): 385–388

[21] HUANG B, SHI X Z, YU D S, et al. Environmental assessment of small-scale vegetable farming systems in peri-urban

areas of the Yangtze River Delta Region, China[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2006, 112(4): 391–402

[22] 廖柏寒, 蒋青. 我国酸雨中盐基离子的重要性[J]. 农业环境保护, 2001, 20(4): 254–256
LIAO B H, JIANG Q. Importance of base cations of acid precipitation in China[J]. Agro-Environmental Protection, 2001, 20(4): 254–256

[23] 牛东玲, 王启基. 盐碱地治理研究进展[J]. 土壤通报, 2002, 33(6): 449–455
NIU D L, WANG Q J. Research progress on saline-alkali field control[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2002, 33(6): 449–455

[24] GUO J H, LIU X J, ZHANG Y, et al. Significant acidification in major Chinese croplands[J]. Science, 2010, 327(5968): 1008–1010

[25] 王延平, 程波, 于明, 等. 长期施用氯磷铵钾复混肥对土壤性质和作物产量品质的影响[J]. 辽宁农业科学, 2008, (5): 10–14
WANG Y P, CHENG B, YU M, et al. Effect of long-term application of cholo-ammoniopotassium phosphate compound fertilizer on soil property, crop yield and quality[J]. Liaoning Agricultural Sciences, 2008, (5): 10–14

[26] 农业农村部耕地质量监测保护中心. 30 年耕地质量演变规律[M]. 北京: 中国农业出版社, 2019
Center of Arable Land Quality Monitoring and Protection, Ministry of Agricultural and Rural Affairs. The Evolution of Cultivated Land Quality in Past 30 Years[M]. Beijing: China Agricultural Press, 2019

[27] NOBLE A D, ZENNECK I, RANDALL P J. Leaf litter ash alkalinity and neutralisation of soil acidity[J]. Plant and Soil, 1996, 179(2): 293–302

[28] POCKNEE S, SUMNER M E. Cation and nitrogen contents of organic matter determine its soil liming potential[J]. Soil Science Society of America Journal, 1997, 61(1): 86–92

[29] TANG C, YU Q. Impact of chemical composition of legume residues and initial soil pH on pH change of a soil after residue incorporation[J]. Plant and Soil, 1999, 215(1): 29–38

[30] YAN F, SCHUBERT S. Soil pH changes after application of plant shoot materials of *Faba bean* and wheat[J]. Plant and Soil, 2000, 220(1/2): 279–287

[31] 孟红旗, 吕家珑, 徐明岗, 等. 有机肥的碱度及其减缓土壤酸化的机制[J]. 植物营养与肥料学报, 2012, 18(5): 1153–1160
MENG H Q, LÜ J L, XU M G, et al. Alkalinity of organic manure and its mechanism for mitigating soil acidification[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2012, 18(5): 1153–1160