

兰州市耕地养分综合评价及其影响因素研究

张妍娥^{1,2}, 杨 鹏¹, 马延龙^{2*}, 康 乐¹, 张利瑞¹, 王泉灵¹, 张松林^{1*}

(1. 西北师范大学地理与环境科学学院, 甘肃 兰州 730070; 2. 甘肃省地质矿产勘查开发局第三地质矿产勘查开发研究院, 甘肃 兰州 730050)

摘要:【目的】综合评估兰州市耕地土壤养分水平, 摸清其分布特征, 探明其影响因素, 进而提出施肥建议。【方法】采集了兰州市五个县区 618 份耕地土样, 测定其有机质、全氮、速效钾、有效磷含量以及土壤 pH 值, 采用主成分分析法对其土壤养分进行综合评价, 以地理加权回归模型 (GWR) 分析土壤养分综合水平的影响因素。【结果】① 研究区耕地土壤偏碱性, 有机质和全氮含量普遍偏低, 速效钾含量较丰富, 有效磷含量高低不均。② 研究区耕地土壤养分综合水平以低等级为主, 占研究区耕地总面积的 50.46%, 其次是中等和极低等级, 分别占耕地总面积的 29.61% 和 19.30%, 高等级地极少, 仅占比 0.63%。养分综合水平主要限制因素为有机质和全氮含量。③ 研究区耕地土壤养分综合水平偏低且受海拔高度和年均气温因素的影响程度较大。【结论】研究区耕地土壤养分分布不均且综合养分水平偏低, 综合养分水平主要受海拔高度和年均气温因素的影响, 建议根据土壤营养元素丰缺、综合养分水平和作物生长需求平衡施肥。

关键词: 土壤养分; 主成分分析; 空间分布; 地理加权回归模型; 兰州

中图分类号: X825 **文献标识码:** A **文章编号:** 0564-3945(2023)05-1023-09

DOI: 10.19336/j.cnki.trtb.2022042402

张妍娥, 杨 鹏, 马延龙, 康 乐, 张利瑞, 王泉灵, 张松林. 兰州市耕地养分综合评价及其影响因素研究 [J]. 土壤通报, 2023, 54(5): 1023 - 1031

ZHANG Yan-e, YANG Peng, MA Yan-long, KANG Le, ZHANG Li-rui, WANG Quan-ling, ZHANG Song-lin. Soil Nutrient Comprehensive Evaluation of Cultivated Land and Influencing Factors in Lanzhou[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2023, 54(5): 1023 - 1031

【研究意义】土壤养分含量水平高低是土壤肥力的重要标志, 对农作物产量、品质和耕地的可持续利用十分关键^[1]。不合理的施肥方式导致我国不少地区耕地土壤的养分失衡和肥力下降^[2]。对土壤养分进行综合评价并探究其影响因素可以为土壤养分资源的科学管理与发展均衡施肥的精细农业提供参考依据。【前人研究进展】土壤养分综合评价指标众多, 作用不一, 如何选取适量的指标以全面准确地反映土壤养分的整体特征至关重要。碳、氮、磷和钾是农作物生长的主要竞争性营养资源^[3], 所以常被用于耕地土壤养分水平评价。评价土壤综合养分和肥力水平的方法很多, 如模糊数学法、层次分析法、因子分析法、主成分分析和聚类分析法等。例如, 汪景宽等^[4]采用因子分析法结合隶属函数计算东北典型黑土地土壤的肥力质量综合指数; 任家强等^[5]采用层次分析和模糊评价法对阜蒙县耕地的地力进行了

定量评价。土壤养分水平受诸多因子的综合影响, 且这些因子间存在或多或少的相关性, 可能会导致其代表的信息发生重叠。主成分分析法可以对多个因子进行降维分析, 抽取主成分并赋予不同得分, 弱化变量间自相关性引起的误差^[6], 故广泛用于土壤养分和肥力质量等的综合评价^[7]。例如, 许仙菊等^[8]用养分丰缺诊断和主成分分析相结合方法评价了桑园土壤的肥力; 黄馨等^[9]用主成分分析法对降香黄檀不同混交模式下的土壤肥力进行了比较评价。地理加权回归模型 (GWR) 能有效处理回归分析中的空间非平稳性和依赖性, 广泛应用于土壤养分影响因素分析和空间异质性研究^[10]。赵明松等^[11]用 GWR 模型分析了江苏省土壤有机质含量的空间分布特点。【本研究切入点】耕地土壤养分评价已从简单的养分形态描述向指标化和定量化的方向发展^[12], 而目前对土壤养分影响因素的研究多集中在单个指标层面,

收稿日期: 2022-04-24; 修订日期: 2022-09-03

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51068025) 和甘肃省绿洲资源环境与可持续发展重点实验室资助

作者简介: 张妍娥 (1996-), 女, 甘肃省会宁县, 在读硕士生, 研究方向为资源与环境评价。E-mail: 1164384998@qq.com

*通讯作者: E-mail: 1551410352@qq.com; E-mail: zhangsonglin65@nwnu.edu.cn

对土壤养分综合水平的影响因素研究较少。当前兰州市耕地土壤养分特征不清、综合养分水平不明,导致肥料偏施滥施现象较严重,不能“适产质优”。

【拟解决的问题】因此,本研究以兰州市域为评价尺度,采用主成分分析法评价耕地土壤养分的综合水平,用 GWR 模型探明其影响因素,以期为研究区和类似地区农业的可持续发展提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

兰州市位于黄土高原与青藏高原的交汇处(102°35′~104°34′ E, 35°34′~37°07′ N),总面积 1.33 万 km²,常住人口 413.43 万(截止 2021 年末),辖三区五区,包括城关区、七里河区、安宁区、西固区、红古区、皋兰县、榆中县和永登县。年均气温 9.8 ℃,年均降水量 327 mm,年均蒸发量 1468

mm,年均日照时数 2424 h,无霜期 182 d 以上。境内主要河流为黄河及其支流湟水、庄浪河和大通河。农用地类型主要为草地(7102.82 km²)、耕地(2604.17 km²)和林地(1480.80 km²)等。耕地以旱地为主,面积 1787.79 km²,占 68.65%;水浇地次之,面积为 814.83 km²,占 31.29%;水田很少,面积 1.54 km²,仅占 0.06%。土壤以灰钙土为主,占 67.15%,其次为粟钙土、灰褐土、黑垆土、黄绵土、灌淤土和红土等。灰钙土主要分布在永登县南部、皋兰县和榆中县东部山区;粟钙土分布在永登县西南和西北部;灰褐土主要分布在榆中县马啣山山间平地 and 沟洼地;红土分布面积最少,主要在兰州北部低山黄土严重剥露区。粮食作物以玉米和小麦为主,经济作物以马铃薯、百合和白兰瓜为主,是高原夏菜的重要基地。由于安宁区无耕地,永登县和西固区数据缺失,故不在本文研究范围内(图 1)。

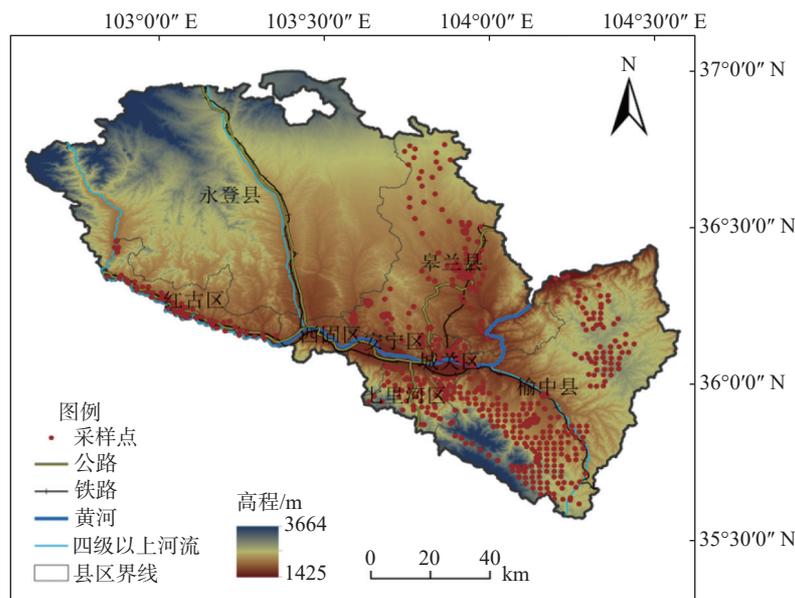


图 1 研究区采样点位分布

Fig.1 Distribution of sampling sites in the study area

1.2 研究方法

1.2.1 土壤采集与分析 基于研究区第二次全国土地调查的耕地图斑,依据代表性与整体均匀性原则,在研究区耕地布设 618 个采样点位,采样密度为 1 点 km⁻²(图 1)。在 2018 年 8~12 月和 2019 年 4~7 月,根据《土壤环境监测技术规范》(HJ/T 166—2004),选择近期无明显降水的时间采集 0~20 cm 表层土样。利用卫星导航仪结合地形和地物确定采样点位,使采样点高程定点误差小于 50 m。为增强

样品的代表性,采用双对角线采样法,先在采样小格中间位置取土,然后在东南西北四个方向再次取土,混匀后四分法取 1500 g,注意采样时避免采集有明显肥料团块的土壤,以免影响测定结果。土样参照《土地质量地球化学评价规范》(DZ/T 0295—2016)风干,用木锤碾压,去除杂质后研磨混匀,过孔径 2 mm 的尼龙筛,未过筛的土粒重新碾压过筛。过筛后的样品充分搅匀后封存待测。

样品指标测定:参照《土壤农化分析》,依据

NY/T 1377—2007, 采用酸度计法测定土壤 pH 值; 依据 NY/T 1121.6—2006, 采用重铬酸钾氧化法测定土壤有机质含量; 依据 NY/T 53—1987, 采用凯氏定氮法测定全氮含量; 依据 NY/T 1849—2010, 采用联合浸提—比色法测定有效磷含量; 依据 LY/T 1236—1999, 采用等离子体发射光谱法测定速效钾含量。

1.2.2 数据来源与处理 本研究以 1:25 万比例尺的土地利用现状图与行政区划图在 ArcGIS 中叠加并提取耕地类型后构建的图斑作为评价单元^[13], 形成的各评价单元空间界线及行政隶属关系明确, 且同一评价单元内土地利用类型相同。行政边界矢量数据来自国家基础地理信息中心 (<http://ngcc.sbsm.gov.cn>); 数字高程模型 (DEM) 数据的空间分辨率为 200 m, 源于地理空间数据云平台 (<http://www.gscloud.cn>); 坡度 (°)、坡向 (°) 和曲率 (m⁻¹) 数据通过 DEM 数据计算获得; 归一化植被指数 (NDVI) 数据的空间分辨率为 1 km, 来自中国科学院资源环境科学数据中心 (<http://www.resdc.cn>); 作物熟制、土壤含水量 (%)、年均气温 (°C) 和年均降水量 (mm) 数据的空间分辨率为 1 km, 来自国家地球系统科学数据中心 (<http://www.geodata.cn/index.html>)。土壤含水量等数据均选取与土样采集同时期的数据。

1.2.3 土壤养分综合评价 主成分分析法可以把多个因子转化成较少的互不相关的综合因子^[14]。在 SPSS 软件中, 通过因子分析获取参评土壤指标的主成分特征值和特征向量, 计算出各主成分的得分后, 求算反映土壤养分综合水平的分值 SNCI (soil

nutrient comprehensive index) ^[15]:

$$SNCI = \lambda_1 F_1 + \lambda_2 F_2 + \dots + \lambda_m F_m \quad (1)$$

式中: $F_1 \sim F_m$ 表示对应主成分的得分; $\lambda_1 \sim \lambda_m$ 表示对应主成分的贡献率。

对得到的 SNCI 值进行聚类分析并将其分级^[16], 以该分级为标准绘制 *Kriging* 插值图, 评价研究区土壤养分综合水平的空间分布特征^[17]。

1.2.4 土壤养分综合水平的影响因素分析 地理加权回归模型通过建立空间范围内每个点的局部回归方程反映自变量与因变量的空间相互影响关系^[18]:

$$Y_{\text{gwr}}(u_i, v_i) = \beta_0(u_i, v_i) + \sum_{z=1}^k \beta_z(u_i, v_i) X_k(u_i, v_i) \quad (2)$$

式中: (u_i, v_i) 为样本点 i 的经纬度; $\beta_0(u_i, v_i)$ 为回归方程截距; $\beta_z(u_i, v_i)$ 为连续函数 $\beta_z(u, v)$ 在 i 的第 z 个回归参数值; $X_k(u_i, v_i)$ 为函数 $X_k(u, v)$ 在 i 的实际值; k 为样本点 i 回归项的个数。

2 结果与分析

2.1 土壤养分含量与 pH 值描述性统计

描述性统计可以客观反映研究区土壤养分含量的基本特征。本研究以 3σ 原则识别异常值并将其剔除。表 1 表明, 根据标准差, 研究区土壤养分指标在样点间的离散程度为速效钾 > 有效磷 > 有机质 > pH > 全氮; 根据变异系数 ($CV < 0.1$, 弱变异; $0.1 \leq CV \leq 1$, 中等变异; $CV > 1$, 强变异), 土壤有效磷含量属于强变异, 全氮、速效钾和有机质含量以及 pH 值属于中等变异。

表 1 耕地土壤养分和 pH 值描述性统计
Table 1 Descriptive statistics of soil nutrients and pH values in cultivated land

项目 Item	pH 值 pH value	有机质 (g kg ⁻¹) Organic matter	全氮 (g kg ⁻¹) Total nitrogen	有效磷 (mg kg ⁻¹) Available phosphorus	速效钾 (mg kg ⁻¹) Rapidly available potassium
最大值	10.50	56.10	2.40	538.00	1436.00
中位值	8.53	11.80	0.75	20.8	194.00
最小值	7.48	0.93	0.02	0.41	59.10
均值	8.55	13.19	0.75	37.16	223.52
标准差	3.72	7.38	0.39	53.94	123.86
变异系数	0.43	0.56	0.52	1.45	0.55

2.2 土壤养分含量与 pH 值分级

根据《西北地区耕地土壤养分指标分级标准》^[19], 研究区有机质含量以 IV 和 V 级为主, 其次为 III 和 VI 级, I 级很少, 说明研究区有机质含量整体偏低;

全氮含量 IV ~ VI 级样点高达 74.23%, I ~ II 级样点只有 8.92%, 表明研究区土壤氮素普遍缺乏; 有效磷含量 I 和 VI 较高, 其次为 II 和 V 级, 说明研究区土壤有效磷含量两级分化较严重; 速效钾含量以 I

级为主, 其次为 II 和 III 级, V ~ VI 级极少, 说明研究区土壤速效钾含量普遍很高; 研究区耕地的 pH 值

较高, 其中偏碱性的 II 级样点最多, 其次为碱性 I 级样点 (表 2)。

表 2 耕地土壤养分指标和 pH 值分级
Table 2 Soil nutrient index and pH value classification of cultivated land

指标 Index		I 级 Grade I	II 级 Grade II	III 级 Grade III	IV 级 Grade IV	V 级 Grade V	VI 级 Grade VI
有机质 (g kg ⁻¹)	标准	> 30	20 ~ 30	15 ~ 20	10 ~ 15	6 ~ 10	< 6
	样本数	18	68	101	234	118	78
	占比 (%)	2.92	11.02	16.37	37.93	19.12	12.64
全氮 (g kg ⁻¹)	标准	> 1.5	1.25 ~ 1.5	1.00 ~ 1.25	0.75 ~ 1.00	0.50 ~ 0.75	< 0.50
	样本数	14	41	104	150	157	151
	占比 (%)	2.27	6.65	16.85	24.31	25.45	24.47
有效磷 (mg kg ⁻¹)	标准	> 40	25 ~ 40	20 ~ 25	15 ~ 20	10 ~ 15	< 10
	样本数	168	95	57	54	87	156
	占比 (%)	27.23	15.40	9.24	8.75	14.10	25.28
速效钾 (mg kg ⁻¹)	标准	> 200	150 ~ 200	120 ~ 150	100 ~ 120	80 ~ 100	< 80
	样本数	291	130	113	52	17	14
	占比 (%)	47.16	21.07	18.31	8.43	2.76	2.27
pH 值	标准	> 8.5	7.5 ~ 8.5	6.5 ~ 7.5	5.5 ~ 6.5	< 5.5	-
	样本数	271	346	0	0	-	-
	占比 (%)	43.92	56.08	0	0	-	-

2.3 土壤养分综合评价

2.3.1 土壤养分指标处理 为消除指标量纲影响, 需将原始数据进行标准化处理。指标间存在相关性是主成分分析的前提。Pearson 分析表明, 研究区土壤有机质、全氮、有效磷、速效钾含量和 pH 值两两间均呈显著相关 ($P < 0.01$), 符合主成分分析的前提

条件。

2.3.2 贡献率和累积贡献率 根据特征值 ≥ 1 原则, 在表 3 中提取 2 个主成分, 第 1 主成分对于总方差的贡献率是 48.31%, 第 2 主成分对于总方差的贡献率是 25.99%, 其累积贡献率超过 70%, 可以代替原始数据信息较好地反映土壤养分的综合状况。

表 3 耕地土壤养分的总方差解释
Table 3 Interpretation of the total variance of soil nutrients in cultivated land

成分 Component	初始特征值 Initial eigenvalue			提取平方和载入 Extract the sum of squares and load		
	合计 Total	方差 (%) Squared difference	累积 (%) Accumulation	特征值 Characteristic value	贡献率 (%) Contribution rate	累积贡献率 (%) Accumulated contribution rate
1	2.415	48.307	48.307	2.415	48.307	48.307
2	1.300	25.994	74.300	1.300	25.994	74.300
3	0.607	12.148	86.448			
4	0.391	7.817	94.264			
5	0.287	5.736	100.000			

2.3.3 特征值和特征向量 表 4 表明, 有机质含量在第一主成分上的因子载荷量最高 (0.873), 其次是全氮含量 (0.849), 说明有机质和全氮含量是研究区土壤养分水平的首要影响因子, 评分系数 A_1 和 A_2 表示各单项指标对主成分的重要程度。

2.3.4 计算主成分得分和土壤养分综合得分 用 X_1 、 X_2 、 X_3 、 X_4 和 X_5 分别表示土壤有机质、全氮、有效磷、速效钾含量和 pH 值, 对应评分系数 A_1 和 A_2 作

表 4 耕地土壤养分的初始因子载荷与成分得分系数
Table 4 Initial factor load and component score coefficient of cultivated soil nutrients

指标 Index	因子载荷 Factor loading		评分系数 Score coefficient	
	1	2	A_1	A_2
有机质	0.873	0.189	0.361	0.146
全氮	0.849	-0.002	0.352	-0.001
有效磷	0.737	0.119	0.305	0.092
速效钾	0.156	0.908	0.065	0.699
pH	-0.604	0.651	-0.250	0.501

为系数带入计算, 2 个主成分的得分分别为:

$$F_1 = 0.361X_1 + 0.352X_2 + 0.305X_3 + 0.065X_4 - 0.250X_5 \quad (3)$$

$$F_2 = 0.146X_1 - 0.001X_2 + 0.092X_3 + 0.699X_4 + 0.501X_5 \quad (4)$$

将计算出的主成分得分 F_1 、 F_2 与对应的贡献率 λ_1 和 λ_2 带入公式 (1) 中, 计算研究区土壤养分综合水平分值 (SNCI) [20]:

$$SNCI = 0.48307F_1 + 0.25994F_2 \quad (5)$$

2.3.5 土壤养分综合水平分级及分布特征 计算表明研究区土壤养分综合分值 (SNCI) 为 $-0.92 \sim 3.26$, 采用 k 均值法对该值进行聚类分析[21], 将研究区耕地土壤综合养分水平划分为 4 类: I 类, 高水平,

SNCI 值为 $0.60 \sim 3.26$; II 类, 中等水平, SNCI 值为 $0.07 \sim 0.60$; III 类, 低水平, SNCI 值为 $-0.33 \sim 0.07$; IV 类, 极低水平, SNCI 值为 $-0.92 \sim -0.33$ 。图 2 表明, 研究区内耕地以 III 类低水平地为主, 约占耕地总面积的 50.46%, 主要分布在榆中县北部与南部和皋兰县西南部, 在红古区东部和城关区北部也有带状分布。其次为 II 类中等水平地, 约占耕地总面积的 29.61%, 集中分布在七里河区中部、皋兰县北部、红古区和榆中县中部。再次为 IV 类极低水平地, 占耕地总面积的 19.30%, 呈块状分布在榆中县以及城关区东北部。而 I 类高水平耕地极少, 只占耕地总面积的 0.63%, 零星分布在七里河区北部与东部以及皋兰县南部。

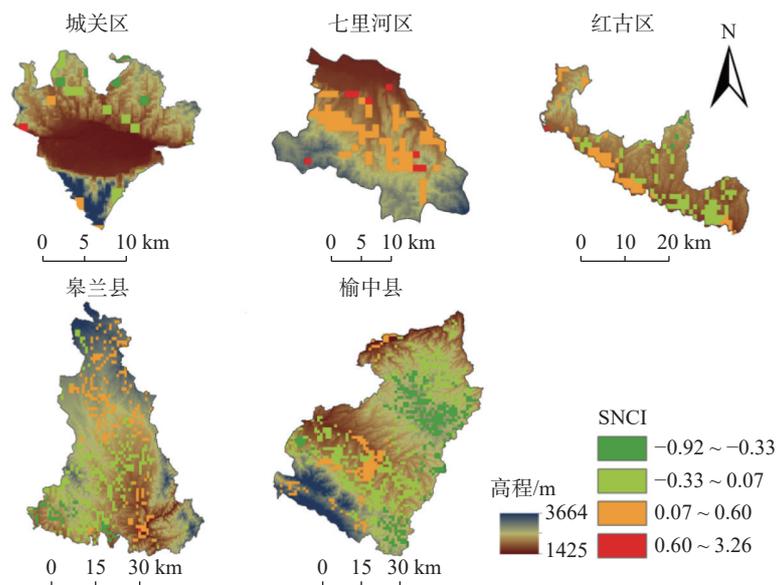


图 2 研究区各县区耕地土壤 SNCI 值的空间分布

Fig.2 Spatial distribution of soil SNCI values at counties and districts in the study area

付天新[22]用甘肃省标准农用地分等方法做出的兰州市七里河区农田自然质量等别分布与本研究得出的七里河区综合养分水平分布趋势基本一致, 只有该区东部稍有不同, 可能是由于本研究并未考虑到立地条件和灌溉特征等因素对土壤养分水平的影响。可见, 土壤综合养分水平是土壤肥力质量的重要影响因素, 且用主成分分析法进行土壤养分综合评价具有较大的可行性和较高的准确性。

2.4 土壤养分综合水平的影响因素

2.4.1 影响因素选择 土壤养分综合水平的空间分布格局可能会受到自然和人为环境因素的影响, 结

合土壤学原理和前人的相关研究成果[23], 本研究初步选取海拔高度、坡度、坡向、曲率、NDVI、土壤含水量、年均降水量、年均气温和作物熟制等 9 个影响因素, 首先将其与 SCNI 值进行相关性分析, 以相关性大小初步判断所选因素的解释力, 剔除与 SCNI 相关性不强的因素; 接着对余下的因素进行方差膨胀因子 (vif) 检验, 剔除具有共线性的因素 ($vif > 10$), 最终筛选出了 NDVI、海拔高度、土壤含水量和年均气温 4 个影响因素。

土壤养分水平与植被生长状况之间存在着复杂的耦合关系, 土壤养分高低直接影响其上植被的生

长状况, 植被生长状况也反过来影响土壤养分的积累。地表植被的长势差异可以体现在植被指数的变化上, 因而可用归一化植被指数 (NDVI) 间接体现土壤的养分状况^[24]。气温影响植被生长和分布, 制约凋落物输入与分解, 影响土壤有机质矿化与养分输入^[25]、有机碳释放速率和碳氮矿化速率^[26]。土壤含水量影响土壤氧化还原过程、微生物活动与养分的溶解、转化与运输^[27]。海拔高度能调节热量和物质再分配, 影响水文动态和植被类型以及土壤侵蚀与堆积过程, 影响土壤有机碳等营养物质的输入和输出, 进而影响表层土壤养分水平及其空间分布^[28]。故本文选取 NDVI、海拔高度、土壤含水量和年均气温作

为 SNCI 的影响因素进行 GWR 分析。

2.4.2 影响因素回归系数的空间分布 图 3 表明, SNCI 各影响因素回归系数具有一定差异。其中, 回归系数绝对值最大的是海拔高度, 表明 SNCI 受海拔高度的影响最大, 其次是年均气温、土壤含水量和 NDVI。海拔高度的回归系数多为负值, 表明大多情况下 SNCI 值随海拔高度增加而减小, 即土壤养分水平较高耕地大多分布在海拔较低地区。因为随着海拔升高气温渐低, 降水量先增加后减少, 且海拔较高处水土易流失, 总体不利于土壤有机质积累, 导致土壤综合养分水平低; 而对于有些低海拔河谷地区来说, 海拔高度适当增加可减少河水泛滥与地下

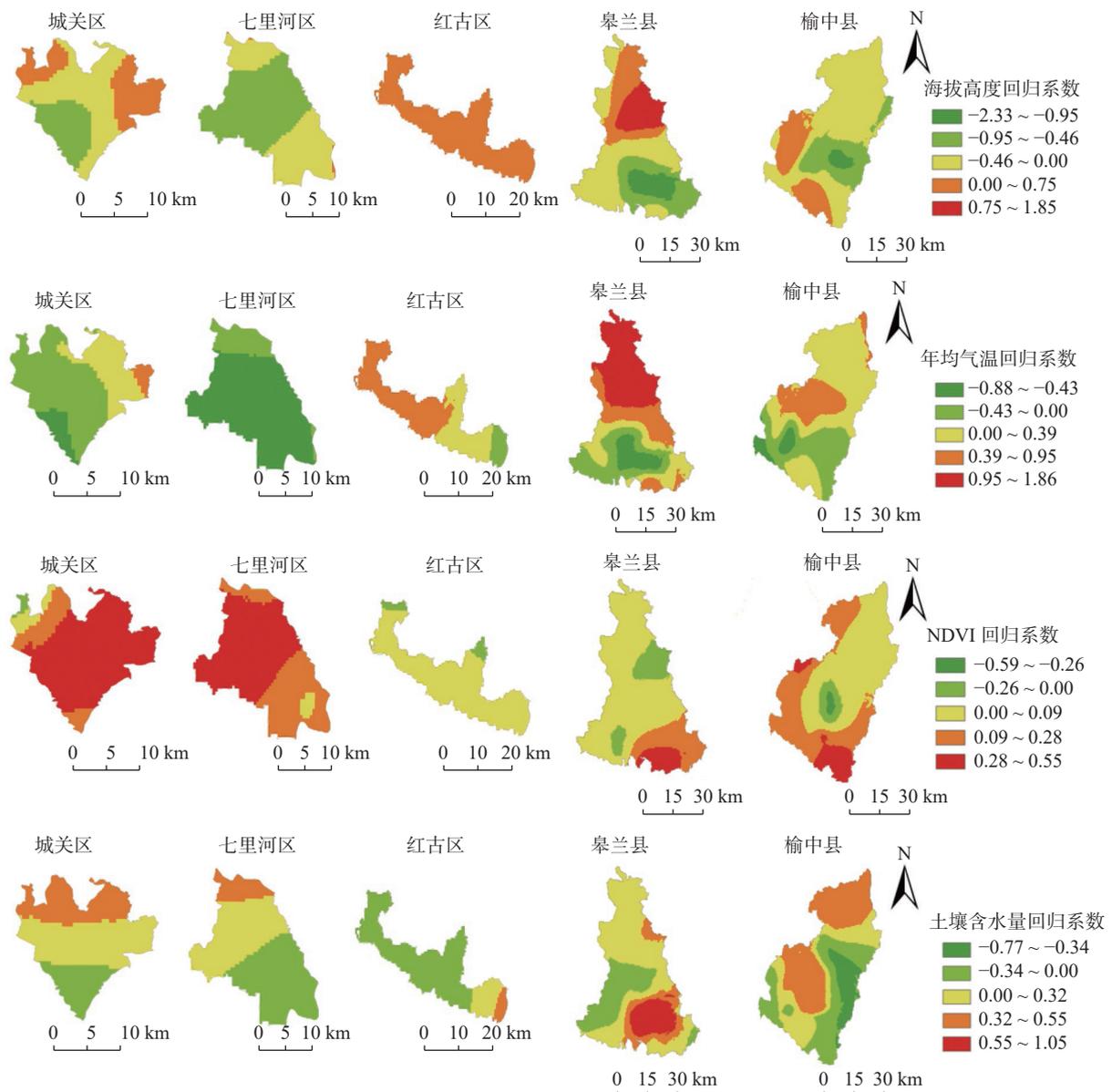


图 3 土壤养分综合分值(SNCI)影响因素回归系数的空间分布

Fig.3 Spatial distribution of the regression coefficients of the factors influencing the soil nutrient comprehensive score (SNCI)

水位过高造成的养分淋滤、盐碱化与水土流失,因此有助于提高土壤养分含量。年均气温回归系数多为正值,因为气温升高可以促进植物光合作用和土壤腐殖质等有机质向养分转化,使土壤养分综合水平升高。NDVI 回归系数几乎全为正值,这与王经波等^[29]等人的研究结果相符,因为 NDVI 反映着土壤有机碳储量及其动态平衡,良好的地表覆盖还能减少侵蚀的发生,防止土壤养分流失。土壤含水量回归系数多为正值,因适当的土壤水分有利于有机质和氮素等营养物质积累^[30],使土壤养分水平升高。负值区主要分布在河谷区和海拔较高区,河谷区盐化灌淤土和薄层灌淤土较多,保水保肥能力差。部分高海拔山地若土壤含水率过高可能会引发泥石流、滑坡等自然灾害,导致水土流失、土壤质量下降。

3 讨论

研究区耕地土壤有机质和全氮含量普遍偏低,速效钾较丰富,有效磷含量高低不均,pH 值偏碱性,与车宗贤^[31]对甘肃省土壤养分特征的研究结果类似。主成分分析结果表明研究区土壤综合养分水平主要限制因素是有机质和全氮含量,与李兴发^[32]的研究结果相似。七里河区耕地土壤养分水平较高与该区地势平坦、灌溉条件好且多为菜地有关。皋兰县东南沿河平缓沟谷地带多为优质耕地,水浇地较多,多为中—高水平地,而西北山地自然条件差,多劣质耕地^[33]。结合魏鹏^[34]的研究结果分析,红古区耕地虽多为旱地,但是中部和北部耕地地块大而平坦,利于灌溉和农田作业,中等地较多分布在此。榆中县东北部几乎全为低—极低等耕地,可能因该区为山区,山峦起伏,沟壑纵横,气候干旱,土地利用主要以旱作农业为主,无灌溉保证率^[35];该县南部和中部为多川区,耕地质量稍好。城关区因其耕地被大量征用,剩余耕地多在土壤沙砾多养分匮乏的南北两山,所以几乎全为低—极低养分水平耕地。

GWR 结果显示,海拔高度对 SNCI 的影响最大,地形作为五大成土因素中的重要因素,能调节热量和物质的再分配^[36],对有机质等营养物质分布起重要作用。其次是年均气温,与高顺平等^[37]的研究结果相似,因为温度影响土壤化学反应以及有机质和氮素的积累。土壤含水量可以直接影响土壤养分的释放和迁移^[38],但是高海拔区土壤含水量过高会加剧泥石流和滑坡导致水土流失。NDVI 对 SNCI 值的影响

最小,可能因研究区的 NDVI 值较小且波动幅度较小,对土壤养分的敏感度较低^[39]。

极低养分水平耕地位于研究区典型的干旱山区,植被稀少,土壤有机质含量极低,无灌溉条件,耕作粗放,施用商品肥很少。对该类土地要加强化肥和有机肥的施用,大量补充有机质、氮素和磷素等养分,并且建议实施引灌工程加强土地灌溉,以保证作物生长的水分需求。低养分水平耕地地势平坦、土地宽广,是全市的主要粮食生产区,有一定灌溉能力。但该区旱地面积比重比较大,有机质含量较低,单产很低。建议采用化肥和有机肥相结合的施肥方式,再辅以秸秆还田等措施,大量补充土壤有机质,以改善土壤结构与培肥土壤,从而促进农作物生产。中—高水平耕地的土地平坦,土壤有机质与全氮含量稍高,有效磷和速效钾含量较高,但是因为该区域主要种植的蔬菜瓜果对有机质与全氮的要求相对其它作物更高^[40]。为了优质高产,建议这些区域加大施用有机肥和粪肥还田力度,不断提高土壤肥力,减少化肥使用量,从而改良土壤,提高农产品品质。同时,仍需加强测土配方施肥,及时探明土壤中各营养元素的丰缺情况,平衡施肥,均衡养分。

4 结论

(1) 研究区耕地土壤偏碱性,有机质和全氮含量普遍偏低,速效钾含量较丰富,有效磷含量高低不均。

(2) 有机质和全氮含量是研究区耕地土壤养分综合水平的主要限制因素,研究区耕地以低水平耕地为主,其次是中等和极低养分水平耕地,高养分水平耕地极少。

(3) 研究区耕地土壤养分综合水平偏低,主要受海拔高度和年均气温因素的影响。

致谢:感谢甘肃省绿洲资源环境与可持续发展重点实验室对本论文项目实验的资助。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 许仙菊,张永春,汪吉东,等.中国三大薯区土壤养分状况及土壤肥力质量评价[J].中国土壤与肥料,2021,(5):27-33.
- [3] Craine J M, Dybzinski R. Mechanisms of plant competition for nutrients, water and light[J]. *Functional Ecology*, 2013, 27(4): 833-

- 840.
- [4] 汪景宽, 李双异, 张旭东, 等. 20年来东北典型黑土地区土壤肥力质量变化[J]. 中国生态农业学报, 2007, (1): 19 - 24.
- [5] 任家强, 汪景宽, 李双异, 等. 辽西阜蒙县耕地地力定量评价研究[J]. 土壤通报, 2010, 41(6): 1294 - 1298.
- [6] 刘江, 吕涛, 张立欣, 等. 基于主成分分析的不同种植年限甘草地土壤质量评价[J]. 草业学报, 2020, 29(6): 162 - 171.
- [7] 刘少春, 张跃彬, 郭家文, 等. 基于养分丰缺分级的蔗田土壤肥力主成分综合分析[J]. 西南农业学报, 2016, 29(3): 611 - 617.
- [8] 许仙菊, 马洪波, 陈杰, 等. 基于养分丰缺诊断和主成分分析相结合的桑园土壤肥力评价[J]. 土壤, 2013, 45(3): 470 - 476.
- [9] 黄馨, 刘君昂, 周国英, 等. 降香黄檀不同混交模式土壤肥力的比较研究[J]. 土壤通报, 2014, 45(5): 1130 - 1136.
- [10] 王栋, 吴晓东, 魏献花, 等. 基于地理加权回归的青藏高原季节冻土区土壤有机碳空间分布研究[J]. 冰川冻土, 2020, 42(3): 1036 - 1045.
- [11] 赵明松, 刘斌寅, 卢宏亮, 等. 基于地理加权回归的地形平缓区土壤有机质空间建模[J]. 农业工程学报, 2019, 35(20): 102 - 110.
- [12] 李政昊, 刘斯泓, 李嘉琦, 等. 辽宁省铁岭植烟区土壤肥力特征及综合评价[J]. 土壤通报, 2022, 53(3): 631 - 639.
- [13] 孙妍芳, 裴久渤, 张立江, 等. 辽宁棕壤耕地质量评价及障碍因素类型分区研究[J]. 中国农业资源与区划, 2017, 38(11): 130 - 137, 144.
- [14] 张润楚. 多元统计分析[M]. 北京: 科学出版社, 2006.
- [15] 樊星火, 葛红艳, 张参参, 等. 江西省生态公益林典型林分土壤肥力状况研究[J]. 北京林业大学学报, 2018, 40(11): 84 - 92.
- [16] 王小艳, 冯跃华, 李云, 等. 基于主成分和聚类分析的村域稻田土壤肥力评价[J]. 中国农学通报, 2014, 30(33): 46 - 50.
- [17] 杨晓娟, 廖超英, 孙文艳, 等. 乌兰布和沙漠东北部沙区人工林土壤肥力质量评价[J]. 干旱区研究, 2012, 29(4): 604 - 608.
- [18] 王雅楠, 赵涛. 基于GWR模型中国碳排放空间差异研究[J]. 中国人口·资源与环境, 2016, 26(2): 27 - 34.
- [19] 耿荣, 王明国, 尹学红, 等. 基于主成分分析的中宁县农田土壤肥力评价[J]. 农业科学研究, 2021, 42(1): 1 - 7.
- [20] 郭瑞, 李静怡, 郑险峰, 等. 大荔枣园土壤养分空间分布及土壤肥力综合评价[J]. 西北林学院学报, 2021, 36(3): 121 - 127.
- [21] 吴湘琳, 陈署晃, 赖宁, 等. 基于主成分分析和聚类分析果园土壤养分综合评价[J]. 新疆农业科学, 2018, 55(7): 1286 - 1292.
- [22] 付天新, 闫浩文, 骆成凤, 等. 兰州市七里河区农用地分等更新评价与分析[J]. 国土资源遥感, 2012, (3): 140 - 145.
- [23] 姜霓雯, 童根平, 叶正钱, 等. 浙江清凉峰自然保护区土壤肥力指标空间变异及其影响因素[J]. 生态学报, 2022, 42(6): 2430 - 2441.
- [24] 李燕丽, 潘贤章, 周睿, 等. 长期土壤肥力因子变化及其与植被指数耦合关系[J]. 生态学杂志, 2013, 32(3): 536 - 541.
- [25] 罗梅, 郭龙, 张海涛, 等. 基于环境变量的中国土壤有机碳空间分布特征[J]. 土壤学报, 2020, 57(1): 48 - 59.
- [26] 丁亚鹏, 张俊华, 刘玉寒, 等. 基于GWR模型的伊河流域土壤有机碳空间分布特征及影响因素分析[J]. 生态学报, 2021, 41(12): 4876 - 4885.
- [27] 李红林, 贡璐, 朱美玲, 等. 塔里木盆地北缘绿洲土壤化学计量特征[J]. 土壤学报, 2015, 52(6): 1345 - 1355.
- [28] Zhang S L, Zhang X Y, Huffman T, et al. Influence of topography and land management on soil nutrients variability in Northeast China[J]. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 2011, 89: 427 - 438.
- [29] 王经波, 郑利林, 郭宇菲, 等. 鄱阳湖湿地土壤有机碳空间分布及其影响因素[J]. 长江流域资源与环境, 2022, 31(4): 915 - 926.
- [30] 董悦. 基于GWR模型的尧都区中部土壤养分与重金属空间变异规律研究[D]. 太原: 山西师范大学, 2019.
- [31] 车宗贤. 甘肃土壤肥力演变特征及培肥技术研究[R]. 甘肃省: 甘肃省农业科学院土壤肥料与节水农业研究所, 2017.
- [32] 李兴发. 基于土壤养分的皋兰县耕地质量评价[D]. 兰州: 甘肃农业大学, 2018.
- [33] 火玉玲. 甘肃省皋兰县黑石川乡西边沟基本农田利用现状与对策[J]. 农业工程, 2015, 5(5): 79 - 81.
- [34] 魏鹏, 刘学录. 兰州市红古区农用地分等评价与分析[J]. 草原与草坪, 2014, 34(4): 43-46.
- [35] 卜春燕, 米成林, 汪延彬. 基于GIS的甘肃省榆中县耕地质量监测评价[J]. 甘肃农业科技, 2021, 52(8): 28 - 32.
- [36] Liu F, Zhang G L, Sun Y J, et al. Mapping the three-dimensional distribution of soil organic matter across a subtropical hilly landscape[J]. Soil Science Society of America Journal, 2013, 77(4): 1241 - 1253.
- [37] 高顺平, 何明珠, 白光祖, 等. 甘肃陇西中药材种植区土壤有机质分布特征[J]. 干旱地区农业研究, 2020, 38(5): 192 - 197 + 251.
- [38] 张兰, 夏红霞, 朱启红, 等. 水分调节对施用生物炭的重金属污染土壤速效养分的影响研究[J]. 节水灌溉, 2022, (4): 60 - 64, 76.
- [39] 陈玉, 焦菊英, 田红卫, 等. 黄土高原归一化植被指数与自然环因子的空间关联性——基于地理探测器[J]. 生态学报, 2022, 42(9): 3569 - 3580.
- [40] 车升国. 区域作物专用复合(混)肥料配方制定方法与应用[D]. 北京: 中国农业大学, 2015.

Soil Nutrient Comprehensive Evaluation of Cultivated Land and Influencing Factors in Lanzhou

ZHANG Yan-e^{1,2}, YANG Peng¹, MA Yan-long^{2*}, KANG Le¹,
ZHANG Li-rui¹, WANG Quan-ling¹, ZHANG Song-lin^{1*}

(1. School of Geography and Environmental Sciences, Northwest Normal University, Lanzhou 730070, China; 2. The Third Institute of Geology and Mineral Exploration and Development, Gansu Bureau of Geology and Mineral Exploration and Development, Lanzhou 730050, China)

Abstract: [Objective] The aims were to comprehensively evaluate the soil nutrients' levels of the cultivated land in Lanzhou city, to find out their distribution characteristics and influence factors, and then to propose reasonable fertilization suggestions. [Method] In this study, 618 cultivated soil samples were collected from five counties of Lanzhou, and the soil organic matter, total nitrogen, rapidly available potassium, available phosphorus contents and pH value were determined. Principal component analysis was used to evaluate soil nutrients comprehensively, and the influence factors of soil nutrient comprehensive level were analyzed by geographically weighted regression model (GWR). [Result] ①The cultivated soil in the research area was alkaline, the contents of soil organic matter and total nitrogen were generally low, the rapidly available potassium contents were rich, and the available phosphorus contents were uneven. ②The soil comprehensive nutrients in the research area were mainly of low-level, accounting for 50.46% of the total cultivated area in the research area, medium and extremely low grades were next, accounting for 29.61% and 19.30% of the total cultivated area, and the higher level land rarely accounted for only 0.63%. Soil organic matter and total nitrogen contents were the main limiting factors for the comprehensive level of soil nutrients in cultivated land. ③The comprehensive level of soil nutrients of cultivated land in the study area was relatively low and greatly affected by altitude and annual average temperature. [Conclusion] In the research area, the cultivated land soil nutrients distribution is uneven, and the comprehensive level of nutrients is low. The comprehensive nutrient level is mainly affected by altitude and the average annual temperature factors. It is suggested to balance fertilization according to the soil comprehensive nutrient levels, nutrient abundance and crop growth requirements.

Key words: Soil nutrient; Principal component analysis; Spatial distribution; Geographically weighted regression model; Lanzhou

[责任编辑: 裴久渤 高晓丹]