

## 青海省设施农田土壤养分特征及综合评价

操一芸, 宋明丹, 塔林葛娃, 王慧, 王小梅, 周子哲, 陈尧, 付娇娇, 李月梅

### 引用本文:

操一芸, 宋明丹, 塔林葛娃, 等. 青海省设施农田土壤养分特征及综合评价[J]. *农业环境科学学报*, 2026, 415(1): 148–155.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11654/jaes.2025-0656>

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

#### 基于Moran's $I$ 的菜地土壤属性空间分布格局分析

王强, 郑梦蕾, 叶治山, 杨善莲, 马友华

*农业环境科学学报*. 2020, 39(10): 2297–2306 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-0324>

#### 艾比湖湿地土壤水分-盐分-养分空间异质性分析

方丽章, 李艳红, 李发东, 朱海强

*农业环境科学学报*. 2019, 38(1): 157–167 <https://doi.org/10.11654/jaes.2018-0632>

#### 长期施肥对设施菜田土壤氮、磷时空变化及流失风险的影响

石宁, 李彦, 井永苹, 薄录吉, 张英鹏, 孙明, 仲子文

*农业环境科学学报*. 2018, 37(11): 2434–2442 <https://doi.org/10.11654/jaes.2018-1065>

#### 红壤幼龄桔园套种豆科牧草后土壤酸度变化特征

蔡泽江, 徐明岗, 张璐, 王伯仁, 文石林, 申华平

*农业环境科学学报*. 2017, 36(2): 308–313 <https://doi.org/10.11654/jaes.2016-0829>

#### 虾壳生物炭对Cd-As复合污染土壤修复效应及土壤可溶性有机碳含量的影响

孙涛, 孙约兵, 贾宏涛, 吴泽赢

*农业环境科学学报*. 2021, 40(8): 1675–1685 <https://doi.org/10.11654/jaes.2021-0056>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

操一芸, 宋明丹, 塔林葛娃, 等. 青海省设施农田土壤养分特征及综合评价[J]. 农业环境科学学报, 2026, 45(1): 148–155.

CAO Y Y, SONG M D, T L G W, et al. Characteristics and comprehensive evaluation of soil nutrients in facility farmland in Qinghai Province[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2026, 45(1): 148–155.



开放科学 OSID

## 青海省设施农田土壤养分特征及综合评价

操一芸<sup>1</sup>, 宋明丹<sup>1,2</sup>, 塔林葛娃<sup>1,2</sup>, 王慧<sup>1</sup>, 王小梅<sup>1</sup>, 周子哲<sup>1</sup>, 陈尧<sup>1</sup>, 付娇娇<sup>1</sup>,  
李月梅<sup>1,2\*</sup>

(1. 青海大学农林科学院, 西宁 810016; 2. 农业农村部西宁野外综合科学观测研究站, 西宁 810016)

**摘要:**为探明青海省设施农田土壤养分状况及其空间分布特征,把握设施农田土壤养分变化的驱动因素,本研究基于青海省设施农田集中分布区的733个表层土壤(0~20 cm)样本,结合统计学与空间分析,揭示县域土壤养分空间异质性规律,评估土壤养分综合状况并解析其驱动因素。结果表明:研究区土壤pH较高,有机质和全氮含量较低,全磷、全钾、碱解氮、速效磷和速效钾含量高。总体上,研究区养分失衡现象较为严重,尤其是土壤全磷含量过高;土壤养分综合得分整体呈现东北部高、西南部低的趋势,与年度国民生产总值呈极显著正相关关系;空间分析结果揭示出各土壤养分指标呈现显著空间分异与集聚特征,有机质、全氮、碱解氮低值区集聚于尖扎与贵德,高值区集中在乐都、西宁及大通,pH空间特征与之呈反向分布。研究表明,青海省设施农田土壤养分状况具有明显的空间分布特征,受环境因素和人为管理的双重影响明显,可利用区域养分特征制定详细的土壤管理策略。

**关键词:**设施农田;地统计学;土壤养分综合评价;GIS

中图分类号:S158 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2026)01-0148-08 doi:10.11654/jaes.2025-0656

### Characteristics and comprehensive evaluation of soil nutrients in facility farmland in Qinghai Province

CAO Yiyun<sup>1</sup>, SONG Mingdan<sup>1,2</sup>, Talingewa<sup>1,2</sup>, WANG Hui<sup>1</sup>, WANG Xiaomei<sup>1</sup>, ZHOU Zizhe<sup>1</sup>, CHEN Yao<sup>1</sup>, FU Jiaojiao<sup>1</sup>, LI Yuemei<sup>1,2\*</sup>

(1. Academy of Agriculture and Forestry Sciences, Qinghai University, Xining 810016, China; 2. Xining Integrated Field Scientific Observation and Research Station of the Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Xining 810016, China)

**Abstract:** This study aimed to examine the soil nutrient status, spatial distribution characteristics, and driving factors of changes in facility farmland in Qinghai Province, providing scientific support for optimizing plateau facility farmland management. Using 733 surface soil samples (0–20 cm) from concentrated facility farmland areas, combined with statistical and spatial analysis, the research explored county-scale soil nutrient heterogeneity, comprehensive nutrient status, and their driving factors. Results indicated high soil pH, low organic matter and total nitrogen, but elevated levels of total phosphorus, total potassium, alkali-hydrolyzable nitrogen, available phosphorus, and available potassium, with significant nutrient imbalances particularly excessive total phosphorus. The comprehensive nutrient score showed a northeast-high and southwest-low pattern, strongly correlated with annual GDP. Spatial analysis revealed distinct aggregation; low values of organic matter, total nitrogen, and alkali-hydrolyzable nitrogen concentrated in Jianzha and Guide, while high values occurred in Ledu, Xining, and Datong, with pH showing an opposite distribution. The findings demonstrate that Qinghai's facility farmland soil nutrients exhibit significant spatial patterns influenced by both environmental factors and human management, providing a basis for developing region-specific soil management strategies.

**Keywords:** facility farmland; geostatistics; comprehensive evaluation of soil nutrients; GIS

收稿日期:2025-07-11 录用日期:2025-08-19

作者简介:操一芸,女,硕士研究生,主要研究方向为农业资源与环境。E-mail:cyy\_yuna@163.com

\*通信作者:李月梅 E-mail:yumeili2002@hotmail.com

基金项目:第二次青藏高原综合科学考察研究项目(2019QZKK0303)

Project supported: Second Comprehensive Scientific Expedition and Research of the Qinghai-Tibet Plateau (2019QZKK0303)



## 1.4 数据分析

参照《土地质量地球化学评价规范》(DZ/T 0295—2016)制定的土壤养分及酸碱度分级标准,分析研究区土壤全氮、全磷、全钾、有机质、碱解氮、速效磷、速效钾以及pH的分布情况。高程数据来自中国科学院计算机网络信息中心成立的地理空间数据云。社会经济数据来自《青海省统计年鉴》及各县区统计年鉴与统计年报。

采用SPSS 27进行Spearman相关性分析、主成分分析、K-means聚类分析,采用OriginPro 2024进行相关性分析、因子分析及相关性热图绘制,空间自相关分析及结果绘制利用ArcGIS Pro 3.1软件完成。

## 2 结果与分析

### 2.1 土壤养分及酸碱度描述性统计

土壤酸碱度是影响土壤养分转换与作物根系吸收的重要因素,是土壤理化性质的重要指标,由表1可知,研究区土壤pH均值为8.20,呈碱性,变异系数为3.98%,属弱变异,说明研究区内土壤酸碱性差异小。研究区内96.51%的土壤样点pH高于7.5,其中强碱性土壤比例达14.75%。土壤有机质含量低,有76.46%低于适中等级,说明多数区域的有机质含量偏低,需进行补充;全氮含量偏低,稍缺及以下等级的样品占40.63%,碱解氮含量适中及以下等级占

37.00%;土壤全磷含量丰富,研究区土壤全磷含量均高于 $1\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ (很丰),速效磷含量在丰富及以上等级占93.92%;土壤中全钾含量较丰富,95.86%的耕地全钾含量高于 $20\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,速效钾含量在丰富及以上等级的占65.46%。

### 2.2 土壤养分及酸碱度空间分布特征

如表2所示,研究区各土壤养分指标的全局莫兰指数均在1%的显著性水平下呈现空间正相关性,说明各个区域土壤养分间并非毫无关联,而是相互交织且相互影响的,整个研究区域土壤养分的目标值和临近的采样点具有一定相似性。

土壤养分的空间变异性指土壤中养分在空间尺度上的差异或关联,在提高作物产量和避免资源浪费方面具有重要作用。为了更直观地展示各项土壤指标的空间分布特征,运用ArcGIS Pro软件地统计模块中的经验贝叶斯克里金方法,采用自然间断法,绘制土壤养分含量及酸碱度空间分布预测图(图2)。土壤全氮含量呈现东北部高、西南部低的大致递减趋势。土壤全磷含量大致走势为东高西低,高峰出现在中部及东部区域。土壤全钾含量分布较为均匀,整体含量处于丰富等级。碱解氮含量分布呈现北高南低的特点,与土壤全氮类似。速效磷分布特征与土壤全磷相似,低峰值出现在西南部,大致呈现出西南低、东北高的趋势。速效钾含量分布自西北部向东南部呈

表1 土壤养分及酸碱度描述性统计  
Table 1 Descriptive statistics of soil indicators

指标 Index	最小值 Min	最大值 Max	均值 Mean	中位数 Median	变异系数 CV/%	偏度 Skewness	峰度 Kurtosis	分布频率 Distribution frequency/%				
								缺 Deficiency	稍缺 Slightly deficient	适中 Moderate	丰富 Abundant	很丰 Extremely abundant
有机质/( $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ )	0.58	54.93	15.95	14.30	47.61	1.33	2.56	20.57	55.89	18.37	3.49	1.68
全氮/( $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ )	0.30	3.13	1.19	1.09	38.94	1.13	1.56	15.14	25.49	39.33	13.44	6.60
全磷/( $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ )	1.03	15.62	3.02	2.54	53.61	2.93	13.88	0	0	0	0	100.00
全钾/( $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ )	17.86	28.73	22.76	22.47	6.88	0.21	0.20	0	0	4.14	86.55	9.31
碱解氮/( $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ )	28.00	687.00	148.03	137.00	41.28	1.77	8.73	2.33	11.51	23.16	23.54	39.46
速效磷/( $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ )	7.00	289.30	67.31	62.30	56.45	1.23	2.80	0	0.52	5.56	21.99	71.93
速效钾/( $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ )	52.00	655.00	202.94	183.00	47.62	1.39	2.24	0	8.54	26.00	24.19	41.27
pH	6.85	9.19	8.20	8.24	3.98	-0.63	1.22	0	0	3.49	81.76	14.75

表2 全局空间自相关分析  
Table 2 Global spatial autocorrelation analysis

指标 Index	全氮 TN	全磷 TP	全钾 TK	碱解氮 AN	速效磷 AP	速效钾 AK	有机质 OM	pH
莫兰指数	0.34	0.37	0.30	0.27	0.33	0.22	0.37	0.38
Z得分	20.00	21.87	17.40	16.01	19.10	12.94	21.56	22.49
P值	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01

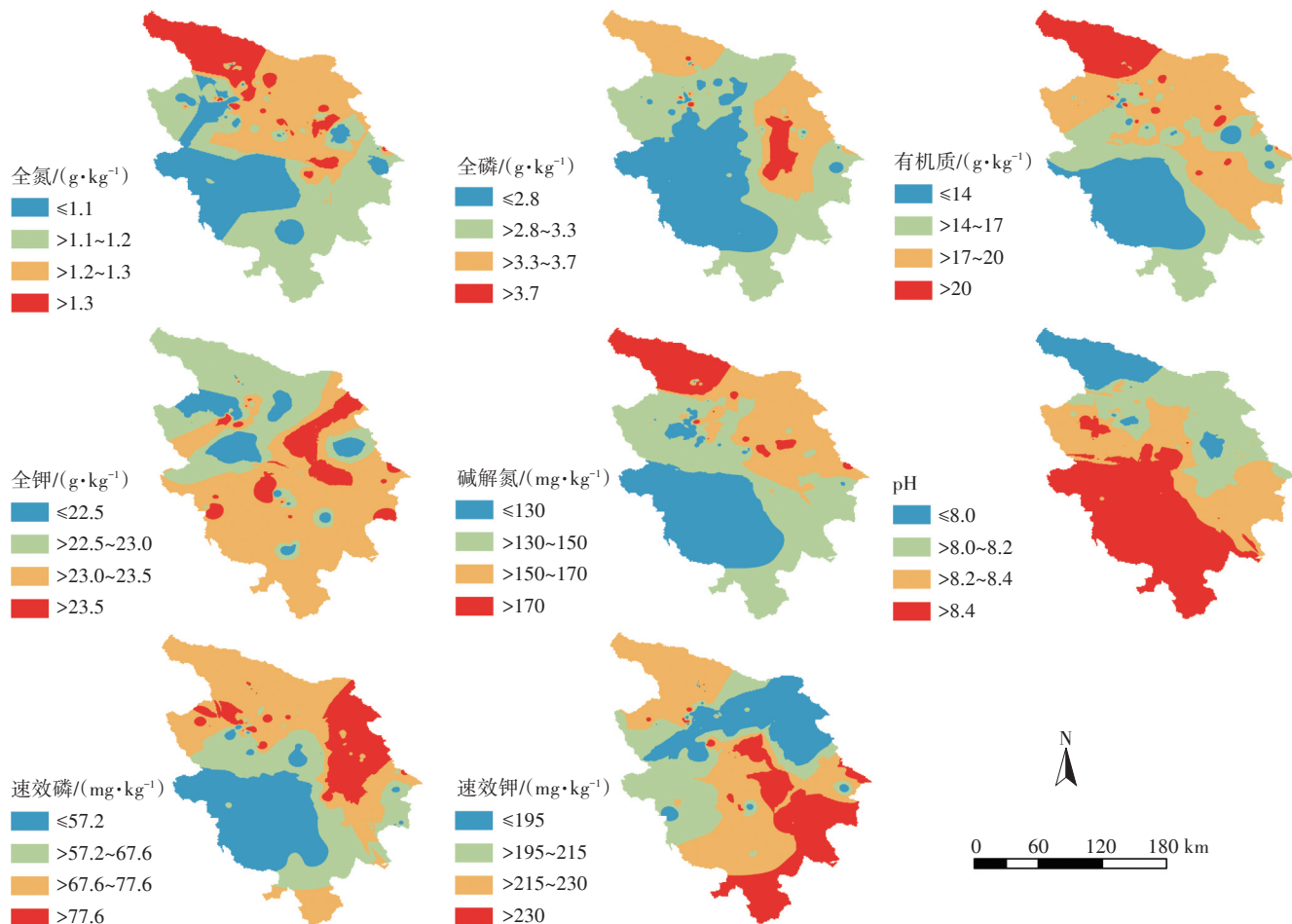


图2 研究区土壤养分及酸碱度空间分布图

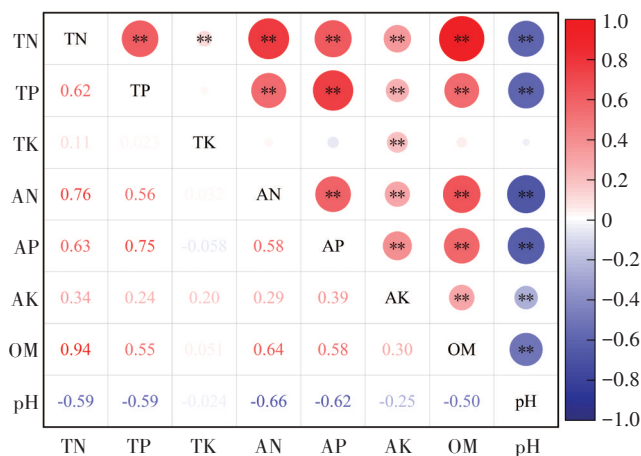
Figure 2 Spatial distribution map of soil nutrients in the study area

现高-低-高趋势,低峰值出现在东部及中部,高峰值出现在中部。有机质分布特征与全氮具有显著相关性,分布特征基本一致。研究区土壤均呈碱性,西南部pH值较其他位置稍高,pH由西南部到东北部方向呈递减趋势,自西北部向东南部方向呈现出低-高-低变化趋势。

### 2.3 土壤养分及酸碱度主成分分析

如图3所示,土壤全氮与全磷、全钾、速效钾、有机质、碱解氮、速效磷都呈极显著正相关;同时,pH与全磷、全氮、有机质、速效磷、速效钾、碱解氮都呈极显著负相关。结果表明研究区所测的8个指标间均存在一定程度的相关性,符合主成分分析的要求。KMO测度及Bartlett球形检验结果显示,KMO值为0.805,伴随概率小于0.01,证明研究区适合利用主成分分析评价土壤养分状况。

如表3所示,以特征值大于1的原则,提取出2个主成分以分析研究区土壤养分状况,2个主成分的累



\*表示相关性显著( $P \leq 0.05$ ),\*\*表示相关性极显著( $P \leq 0.01$ )。  
\*indicates significant correlation ( $P \leq 0.05$ ), \*\*indicates extremely significant correlation ( $P \leq 0.01$ ).

图3 土壤养分及酸碱度相关分析

Figure 3 Analysis of soil nutrient correlation  
计贡献率为70.112%,特征值之和为5.609,表示其涵盖了原始数据的大部分内容,具有解释力。主成分1

表3 主成分分析及特征向量

Table 3 Principal component analysis and eigenvector

指标 Index	因子载荷		特征向量	
	Factor loading		Eigenvectors of matrix	
	主成分1 PC1	主成分2 PC2	主成分1 PC1	主成分2 PC2
全氮	0.914	0.062	0.432	0.059
碱解氮	0.831	-0.060	0.392	-0.057
全磷	0.812	-0.161	0.384	-0.152
速效磷	0.846	-0.097	0.399	-0.091
全钾	0.046	0.887	0.022	0.837
速效钾	0.476	0.529	0.225	0.499
有机质	0.851	0.007	0.402	0.006
pH	-0.796	0.116	0.376	-0.109
特征值	4.486	1.123		
贡献率/%	56.074	14.038		
累计贡献率/%	56.074	70.112		

的特征值和方差贡献率均大于主成分2,即主成分1对评价的影响力大于主成分2。主成分1的累积贡献率为56.074%,有机质、pH、全氮、碱解氮、全磷、速效磷的主成分载荷相对较高,其中有机质和pH是反映土壤肥力状况的重要指标,全氮、碱解氮、全磷和速效磷反映了土壤氮素和磷素的供给能力。主成分2的贡献率为14.038%,全钾和速效钾的载荷值较高,说明主成分2主要反映了全钾和速效钾的信息,反映了土壤的供钾能力。

根据表3可得出因子得分表达式:

$$F_1 = 0.432z_1 + 0.384z_2 + 0.022z_3 + 0.392z_4 + 0.399z_5 + 0.225z_6 + 0.402z_7 + 0.376z_8 \quad (1)$$

$$F_2 = 0.059z_1 - 0.152z_2 + 0.837z_3 - 0.057z_4 - 0.091z_5 + 0.499z_6 + 0.006z_7 - 0.109z_8 \quad (2)$$

式中: $z_1 \sim z_8$ 分别表示标准化的全氮、全磷、全钾、碱解氮、速效磷、速效钾、有机质、pH。特征向量由成分矩阵除以特征值的平方根得到。

根据公式(1)和公式(2)得到土壤养分综合评价得分(*IFI*)表达式:

$$IFI = 0.561F_1 + 0.14F_2 \quad (3)$$

#### 2.4 土壤养分聚类分析

采用K-means聚类将*IFI*值划分为3类:第一类(I)属于高肥力等级,*IFI*在0.65~1.23,占比10.74%;第二类(II)为中肥力等级,*IFI*在0.42~0.56,占比38.03%;第三类(III)属低肥力等级,*IFI*在0.38~0.41,占比51.23%。研究区内土壤综合养分状况较差的区域占比较高,进一步体现出区内土壤肥力不足。

根据上述等级划分,分别统计青海省各区域设施农业土壤肥力等级所占比例,结果见表4。青海省设施农业分布较为集中的大通、湟中、乐都3个区域的土壤养分条件有所不同。乐都的113个样点的*IFI*相对较高,其中36.28%的土壤肥力水平较低,63.72%处于中等及以上肥力水平,显示乐都地区设施土壤养分状况较好。大通的120个样点的*IFI*值为0.49,其中40.00%处于低肥力水平,60.00%处于中等及以上肥力水平。湟中采集的234个样点的*IFI*值相对较低,58.12%的土壤属于低肥力水平,表明湟中地区设施农业土壤养分状况较差。尖扎、同仁、循化3地土壤养分状况整体较差,集中在II、III等级。

设施农业水平作为衡量农村生产功能的重要指标,与当地第一产业发展程度息息相关。对各区域年度国民生产总值(GDP)与*IFI*均值进行肯德尔相关性检验,结果显示*P*值为0.007,相关系数为0.564,即两者间呈极显著正相关关系。因此,从GDP的角度分析各县域设施农业土壤肥力状况具有统计学意义。

### 3 讨论

设施农田土壤养分变化受自然资源限制和人为管理影响,随着耕地资源优化配置以及农业现代化进程的发展要求,土壤养分状况评价成为合理利用土地资源的重要依据。基于主成分-聚类分析法进行土壤养分适宜性评价,将青海省东部设施农业土壤养分状况分为I(高)、II(中)、III(低)级,以统计研究区设施农田土壤养分在各级别所占的比例。结果表明:尖扎、同仁、循化3个区域的土壤养分状况整体较差,集中在II、III等级,这与前人研究结果较一致<sup>[20]</sup>;乐都地区土壤养分综合得分相对较高,其中36.28%的样点处于低肥力水平,63.72%处于中等及以上肥力水平,显示出乐都地区的设施土壤养分状况较好。研究区土壤养分指标除pH和全钾含量的变异系数小于10%,属于弱变异,其余6项指标均表现出中等变异,揭示了研究区土壤养分存在空间异质性,这可能与高原地区复杂的地形结构及较高的生境异质性有关,也反映出研究区不同区域在施肥习惯上的差异。

研究区内土壤有机质与全氮含量偏低,耕层土壤的全氮含量与有机质含量密切相关<sup>[21]</sup>,设施农田种植年限的延长可能导致土壤肥力的减弱,使得全氮和有机质含量缺乏<sup>[22]</sup>。同时,全氮含量与土壤类型也存在关联<sup>[23]</sup>,土壤碱性过强会导致氮素以挥发的形式从土壤中流失<sup>[24]</sup>。土壤全氮及有机质缺乏反映出研究区

表4 不同地区土壤养分综合评价得分(IFI)情况

Table 4 Comprehensive evaluation scores of soil nutrients in different regions

行政区 Administrative region	年度生产总值 GDP/亿元	样本数 Sample size/个	变幅 Range	平均值 Mean value	标准差 Standard deviation	土壤肥力等级所占比例 Proportion of soil fertility grades/%		
						I (高 High grade)	II (中 Medium grade)	III (低 Low grade)
						西宁	1 363.24	65
大通	158.66	120	0.15~1.07	0.49	0.18	20.83	39.17	40.00
湟中	242.13	234	0.18~0.97	0.42	0.13	5.98	35.90	58.12
乐都	36.95	113	0.21~1.23	0.51	0.18	15.93	47.79	36.28
平安	43.82	57	0.22~0.79	0.43	0.12	7.02	49.12	43.86
民和	28.89	52	0.25~1.02	0.37	0.15	9.62	9.62	80.76
互助	30.03	44	0.23~0.84	0.49	0.11	6.82	65.91	27.27
尖扎	40.91	20	0.24~0.60	0.35	0.10	0	30.00	70.00
贵德	97.69	26	0.13~0.70	0.36	0.12	3.84	11.54	84.62
同仁	129.92	15	0.11~0.44	0.29	0.11	0	6.67	93.33
化隆	117.1	13	0.19~0.98	0.43	0.24	15.38	15.38	69.24
循化	60.87	5	0.38~0.51	0.45	0.05	0	80.00	20.00
湟源	133.64	9	0.21~0.71	0.42	0.16	11.11	33.33	55.56

偏向施用无机氮肥,若单施无机肥可在短期内提升氮素含量,但同时也会抑制微生物对有机氮的矿化能力,长期施用会导致土壤碳氮比失衡<sup>[25]</sup>。研究区整体表现为有机质和全氮较缺乏,水肥制度是影响其分布的主要因素<sup>[26-28]</sup>。因此,在耕作过程中可以适量施用生物有机肥以促进土壤肥力的提高,或者可以采用复种绿肥等技术模式来促进农田土壤的健康生长。

研究区土壤全磷和速效磷分布呈斑片状,变异系数分别为53.61%和56.45%。造成这种情况的潜在原因有:土壤全磷与速效磷的空间自相关范围较小,只发生在空间相关性较强的小区域,从而形成小斑块,使得土壤磷元素表现出沉积现象。前人研究结果表明,土壤磷素在空间分布上更稳定<sup>[29]</sup>。纵观整个研究区,速效磷含量丰富,但空间分布不均匀,这主要与种植时磷肥的施用量有关,反映了研究区存在设施农田的连作障碍问题,化肥的长期施用会导致磷在土壤中的累积<sup>[30]</sup>。前人研究结果表明,相较于酸性及中性条件,土壤磷释放量在碱性条件下更高<sup>[31]</sup>,且高pH条件下土壤磷易与Ca<sup>2+</sup>、Mg<sup>2+</sup>结合而被固定,导致土壤中磷素的累积<sup>[32]</sup>。速效磷并非研究区限制土壤肥力状况的因素,但应根据土壤肥力状况合理控制磷肥的施用量,避免不合理施肥引发的资源浪费与环境污染问题。

研究区土壤全钾及速效钾含量整体偏高,但在空间分布上呈现出较为突出的条带状,且自东向西呈递减趋势,这可能与地形及土壤母质有关。地形是影响

土壤发育的重要因素,可能会通过地表水文过程和微气候条件的空间再分配来改变土壤中钾的分布<sup>[33]</sup>。钾的溶解度在碱性土壤中较高,可能会导致速效态养分的增加<sup>[34]</sup>。速效钾含量偏高也反映了设施作物对钾素的高吸收。

研究区县域GDP与设施农田土壤养分状况之间存在显著关联,本质上是农业生产力对区域经济贡献的体现,这印证了前人的研究结果<sup>[35-36]</sup>。设施农业依赖高土壤肥力以维持作物高产,而农业产值是县域GDP的重要组成部分。本研究探究了青海省设施农田土壤养分的空间变异特征,未来有必要结合农业生产投入指标以及其他经济因素进行综合评价,探明经济因素与土壤养分的互作机制,以完善设施农田土壤养分管理策略。

#### 4 结论

(1)研究区土壤以碱性为主,全氮和有机质含量偏低,碱解氮含量偏高,钾、磷含量丰富。在今后的农业生产中,应适当增加有机肥和氮肥的施用量,严格控制磷、钾肥施用。

(2)研究区西南部整体土壤养分状况较差,亟需通过调整肥料施用改善土壤健康状况。各区域应根据土壤养分异质性和当地情况实施精准施肥管理,因地制宜地调整土壤养分分配,提高土壤肥力综合水平。

(3)区域GDP与土壤养分状况存在显著关联,各

地区应结合区域特征和政策干预综合施策,最大化县域农业经济生态效益,推动土壤科学定量研究和政策鼓励的精准农业实施。

#### 参考文献:

- [1] 王涛, 曹均学, 杨珍. 发展农业新质生产力的现实困境与实践路径[J]. 西昌学院学报(社会科学版), 2024, 36(5): 70-78. WANG T, CAO J X, YANG Z. The practical dilemma and path of developing new quality productivity in agriculture[J]. *Journal of Xichang University (Social Science Edition)*, 2024, 36(5): 70-78.
- [2] 李文博, 巩晓曦, 吕晓, 等. 中国城市群设施农用地时空演变与布局分型[J]. 农业工程学报, 2024, 40(23): 323-331. LI W B, GONG X X, LÜ X, et al. Spatiotemporal evolution and layout classification of facility agriculture land in urban agglomerations of China[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2024, 40(23): 323-331.
- [3] 王会来, 马嘉伟, 柳丹, 等. 基于主成分-聚类分析的山区果园土壤肥力评价[J]. 果树学报, 2025, 42(5): 1097-1111. WANG H L, MA J W, LIU D, et al. Evaluation of soil fertility of major hilly orchards based on principal component analysis and cluster analysis[J]. *Journal of Fruit Science*, 2025, 42(5): 1097-1111.
- [4] 申桐, 王恒飞, 杜文波, 等. 褐土区典型县域耕地土壤肥力时空演变特征及主控因素[J]. 中国农业科学, 2023, 56(21): 4259-4271. SHEN T, WANG H F, DU W B, et al. Spatial-temporal variability characteristics and main controlling factors of soil fertility in Shouyang County of cinnamon soil area[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2023, 56(21): 4259-4271.
- [5] 王婷, 陆忠军, 辛蕊, 等. 马铃薯主产区土壤养分空间异质性及其肥力评价[J]. 科学技术与工程, 2025, 25(16): 6682-6689. WANG T, LU Z J, XIN R, et al. Spatial heterogeneity and fertility evaluation of soil nutrients in main potato producing areas[J]. *Science Technology and Engineering*, 2025, 25(16): 6682-6689.
- [6] KAHAL A Y, EL-SOROBY A S, MEROÑO DE LARRIVA J E, et al. Mapping soil contamination in arid regions: a GIS and multivariate analysis approach[J]. *Minerals*, 2025, 15(2): 124.
- [7] NARJARY B, NAND V, GOSWAMI S, et al. Restoration of degraded waterlogged saline soil through subsurface drainage: spatiotemporal soil salinity assessment using electromagnetic induction (EMI) and geographic information system (GIS) techniques[J]. *Land Degradation & Development*, 2024, 35(12): 3790-3801.
- [8] VAN VAN P, DUC THUAN N, THI LOAN D. Development of soil quality databases and land potential assessment using GIS: a case study of Lao Cai Province, Vietnam[J]. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2024, 1345(1): 012024.
- [9] 字春光, 钱颖颖, 倪明, 等. 云南南亚热带气候区植烟土壤养分空间分布特征及肥力评价[J]. 西南农业学报, 2024, 37(10): 2252-2260. ZI C G, QIAN Y Y, NI M, et al. Spatial distribution characteristics of soil nutrients and fertility evaluation in tobacco-growing areas of south subtropics, Yunnan Province[J]. *Southwest China Journal of Agricultural Sciences*, 2024, 37(10): 2252-2260.
- [10] 董佳琦, 张勇, 傅伟军, 等. 香榧主产区林地土壤养分空间异质性及其肥力评价[J]. 生态学报, 2021, 41(6): 2292-2304. DONG J Q, ZHANG Y, FU W J, et al. Spatial variation of soil nutrients and evaluation of integrated soil fertility in *Torreya grandis* cv. *Merrillii* region[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2021, 41(6): 2292-2304.
- [11] 赵晴月, 许世杰, 张务帅, 等. 中国玉米主产区土壤养分的空间变异及影响因素分析[J]. 中国农业科学, 2020, 53(15): 3120-3133. ZHAO Q Y, XU S J, ZHANG W S, et al. Spatial regional variability and influential factors of soil fertilities in the major regions of maize production of China[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2020, 53(15): 3120-3133.
- [12] 熊杏, 熊清华, 郭熙, 等. 南方典型丘陵区耕地土壤全氮、有机碳和碳氮比空间变异特征及其影响因素[J]. 植物营养与肥料学报, 2020, 26(9): 1656-1668. XIONG X, XIONG Q H, GUO X, et al. Spatial variation characteristics of total nitrogen, organic carbon and ratio of carbon to nitrogen of cultivated land in typical hilly areas in south China and its influencing factors[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2020, 26(9): 1656-1668.
- [13] 刘杰, 汲玉河, 周广胜, 等. 2000—2020年青藏高原植被净初级生产力时空变化及其气候驱动作用[J]. 应用生态学报, 2022, 33(6): 1533-1538. LIU J, JI Y H, ZHOU G S, et al. Temporal and spatial variations of net primary productivity (NPP) and its climate driving effect in the Qinghai-Tibet Plateau, China from 2000 to 2020[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2022, 33(6): 1533-1538.
- [14] 傅伯杰, 刘焱序, 赵文武, 等. 青藏高原生态安全屏障体系优化[J]. 中国科学院院刊, 2024, 39(11): 1882-1893. FU B J, LIU Y X, ZHAO W W, et al. Optimization for Qinghai - Xizang Plateau ecological security barrier system[J]. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 2024, 39(11): 1882-1893.
- [15] 李本措, 塔林葛娃, 李月梅, 等. 青海高原东部设施农业区土壤氮素时空累积及淋失风险评价[J]. 江苏农业科学, 2019, 47(3): 244-249. LI B C, TALINGEWA, LI Y M, et al. Evaluation of spatiotemporal accumulation and leaching risk of soil nitrogen in facility agriculture areas of eastern Qinghai Plateau[J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2019, 47(3): 244-249.
- [16] 张洋, 张荣. 青海东部设施蔬菜种植区土壤质量评价[J]. 青海农林科技, 2023(3): 8-14. ZHANG Y, ZHANG R. Soil quality evaluation of greenhouse vegetable plantation area in eastern of Qinghai Province[J]. *Science and Technology of Qinghai Agriculture and Forestry*, 2023(3): 8-14.
- [17] 李秋荣, 侯璐, 邵海南, 等. 胡瓜钝绥螨及杀螨剂对青海高原设施花生二斑叶螨的防效[J]. 安徽农业科学, 2022, 50(23): 127-130. LI Q R, HOU L, SHAO H N, et al. Control effect of *Amblyseius cucumeris*(oudemans) and miticides against *Tetranychus urticae* Koch on facility peanuts in Qinghai Plateau[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2022, 50(23): 127-130.
- [18] 王艳萍, 李松龄, 秦艳, 等. 不同年限日光温室土壤盐分及养分动态研究[J]. 中国土壤与肥料, 2011(4): 5-7. WANG Y P, LI S L, QIN Y, et al. Dynamics study on soil salinity and nutrient of greenhouses in different years[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2011(4): 5-7.

- [19] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3版. 北京:中国农业出版社, 2000. BAO S D. Soil and agricultural chemistry analysis[M]. 3rd Edition. Beijing:China Agriculture Press, 2000.
- [20] 付蓉, 袁久东, 陈姣, 等. 青海省春油菜区土壤养分分布特征与肥力评价[J]. 中国土壤与肥料, 2021(4):33-46. FU R, YUAN J D, CHEN J, et al. Distribution characteristics and fertility evaluation of soil nutrients in spring rape area of Qinghai Province[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2021(4):33-46.
- [21] 李祥, 宁琪, 周佳逸, 等. 长期定位施肥对甘薯-小麦体系剖面土壤质量的影响[J]. 土壤, 2024, 56(6):1214-1221. LI X, NING Q, ZHOU J Y, et al. Effects of long-term fertilization on soil profile quality of sweet potato and wheat system[J]. *Soils*, 2024, 56(6):1214-1221.
- [22] 李嘉欣, 李智, 郭明月, 等. 不同种植年限设施蔬菜土壤的理化性质及对供磷能力的影响[J]. 江苏农业科学, 2024, 52(1):210-218. LI J X, LI Z, GUO M Y, et al. Physical and chemical properties of vegetable soil with different planting years and their effects on phosphorus supply capacity[J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2024, 52(1):210-218.
- [23] 党亚爱, 李世清, 王国栋, 等. 黄土高原典型土壤全氮和微生物氮剖面分布特征研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2007, 13(6):1020-1027. DANG Y A, LI S Q, WANG G D, et al. Distribution characteristics of soil total nitrogen and soil microbial biomass nitrogen for the typical types of soils on the Loess Plateau[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2007, 13(6):1020-1027.
- [24] 白潇, 迺超普, 颜晓元, 等. 不同土地利用类型氨挥发氮同位素自然丰度特征[J]. 农业环境科学学报, 2022, 41(7):1590-1597. BAI X, NI C P, YAN X Y, et al. Natural abundance of a volatile nitrogen isotope of ammonia under different land uses[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2022, 41(7):1590-1597.
- [25] 邝雨欣, 张体彬, 程煜, 等. 有机无机肥配施对盐渍化农田无机态氮迁移和玉米生长的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2025, 43(2):105-115. KUANG Y X, ZHANG T B, CHENG Y, et al. Effects of combined application of organic and inorganic fertilizers on inorganic nitrogen movement and maize growth in salinity soils[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2025, 43(2):105-115.
- [26] 马俊永, 曹彩云, 郑春莲, 等. 长期施用化肥和有机肥对土壤有机碳和容重的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2010(6):38-42. MA J Y, CAO C Y, ZHENG C L, et al. Effect of long-term application of chemical fertilizers and organic manure on soil organic carbon and bulk density[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2010(6):38-42.
- [27] 刘学彤, 郑春莲, 曹薇, 等. 长期定位施肥对土壤有机质、不同形态氮含量及作物产量的影响[J]. 作物杂志, 2021(4):130-135. LIU X T, ZHENG C L, CAO W, et al. Effects of long-term located fertilization on soil organic matter, nitrogen forms and crop yields[J]. *Crops*, 2021(4):130-135.
- [28] WANG N, ZHANG T H, CONG A Q, et al. Integrated application of fertilization and reduced irrigation improved maize (*Zea mays* L.) yield, crop water productivity and nitrogen use efficiency in a semi-arid region[J]. *Agricultural Water Management*, 2023, 289:108566.
- [29] 刘宝迪, 白其格那, 赵利清, 等. 昆仑山不同海拔土壤养分及生态化学计量特征[J]. 生态学报, 2025, 45(16):7995-8006. LIU B D, BAI Q G N, ZHAO L Q, et al. Soil nutrients and ecological stoichiometric characteristics at different altitudes in the Kunlun Mountains[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2025, 45(16):7995-8006.
- [30] 李本措, 李月梅, 塔林葛娃. 互助县设施蔬菜施肥现状调查研究[J]. 现代农业科技, 2019(14):62-64. LI B C, LI Y M, TALINGEWA. Investigation on current situation of greenhouse vegetable fertilization in Huzhu County[J]. *Modern Agricultural Science and Technology*, 2019(14):62-64.
- [31] 张雅蓉. 三峡库区消落带土壤磷的有效性及磷的固定研究[D]. 重庆:西南大学, 2014. ZHANG Y R. Research on phosphorus availability and phosphorus fixation in water level fluctuation zone of Three Gorges Reservoir[D]. Chongqing:Southwest University, 2014.
- [32] 彭丽雪, 高广磊, 丁国栋, 等. 塔里木盆地南缘荒漠-湿地-农田土壤碳氮磷化学计量特征[J]. 干旱区资源与环境, 2025, 39(7):119-129. PENG L X, GAO G L, DING G D, et al. Stoichiometric characteristics of carbon, nitrogen and phosphorus in desert-wetland-farmland soils in the southern margin of Tarim Basin[J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2025, 39(7):119-129.
- [33] 解孟平, 宋友桂, 兰敏文, 等. 喜马拉雅南坡墨脱不同海拔表土理化组成及其气候响应[J]. 地球环境学报, 2024, 15(4):624-640. XIE M P, SONG Y G, LAN M W, et al. Physicochemical composition and climate response of surface sediments at different altitudes in Motuo on the southern slope of the Himalayas[J]. *Journal of Earth Environment*, 2024, 15(4):624-640.
- [34] 张全力, 赵彦卿, 张秋兰, 等. 石灰性土壤作物缺钙原因及防治措施[J]. 基层农技推广, 2014, 2(6):62-63. ZHANG Q L, ZHAO Y Q, ZHANG Q L, et al. Causes and prevention measures of calcium deficiency in crops grown in calcareous soils[J]. *Primary Agricultural Technology Extension*, 2014, 2(6):62-63.
- [35] 周恩宇, 赵浪. 基于DEA-Tobit模型的设施农业生产效率及其时空特征研究[J]. 北方园艺, 2023(22):146-152. ZHOU E Y, ZHAO L. Research on the production efficiency of facility agriculture and its spatio-temporal characteristics based on DEA-Tobit model[J]. *Northern Horticulture*, 2023(22):146-152.
- [36] 仝昊天, 夏恩君, 孙聪, 等. 设施农业发展对农业碳排放效率的影响[J]. 中国环境科学, 2024, 44(12):7079-7094. TONG H T, XIA E J, SUN C, et al. Impact of facility agriculture development on agricultural carbon emission efficiency[J]. *China Environmental Science*, 2024, 44(12):7079-7094.

(责任编辑:李丹)