

# 青海省互助县 10 年耕地土壤养分状况、 变化趋势及肥力评价

邓晓倩<sup>1</sup>, 马素娟<sup>2</sup>, 曹晓萍<sup>1</sup>, 王攀<sup>3</sup>, 安韶山<sup>1</sup>

(1.西北农林科技大学 水土保持研究所, 陕西 杨陵 712100; 2.青海省海东市互助县农业技术推广中心, 青海 互助 810599; 3.中国科学院 水利部 水土保持研究所, 陕西 杨陵 712100)

**摘 要:**为了研究青海省互助县 2007—2016 年 10 年间耕地土壤理化性质以及土壤肥力状况的变化,将 4 176 个土壤样点的基本理化指标根据乡镇进行分析比较,采用模糊综合评价的方法对土壤肥力进行评价,以为当地耕地的合理利用提供科学依据。结果表明:(1) 互助县的耕地土壤养分状况整体较好,单个指标质量等级均在前三级。(2) 由于长期使用酸性复合肥,耕地酸碱度降低 5.20%;长期耕种导致耕地肥力消耗,消耗的元素不及时补充,使得 SOM 含量降低 9.69%;TK 降低 32.02%;土壤碳氮比降低 27.28%。(3) 互助县耕地土壤的肥力情况呈现西南低,东北高的趋势。土壤综合肥力指数上升了 5.77%,主要是氮、磷元素升高引起,存在环境污染的风险。因此在后续的耕作过程中,应注重有机肥和钾肥的添加,秸秆还田,蚕豆与其他作物轮作,少施或不施磷肥,降低环境污染风险,确保耕作环境良好,作物可持续生长。

**关键词:**土壤养分; 耕地肥力; 模糊综合评价; 时空变化; 青海互助

中图分类号:S158.2

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2022)06-0112-09

## Evaluation of the Cultivated Land Fertility and Trends of Soil Nutrient Status of Huzhu County in Qinghai Province in the Past 10 Years

DENG Xiaoqian<sup>1</sup>, MA Sujuan<sup>2</sup>, CAO Xiaoping<sup>1</sup>, WANG Pan<sup>3</sup>, AN Shaoshan<sup>1</sup>

(1.Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100,

China; 2.Agricultural Technology Extension Center of Huzhu County, Haidong City, Qinghai Province, Huzhu,

Qinghai 810599, China; 3.Institute of Soil and Water Conservation, CAS & MWR, Yangling, Shaanxi 712100, China)

**Abstract:** In order to study the changes of farmland soil physical and chemical properties and the fertility status in Huzhu County, Qinghai Province from 2006 to 2017, basic physical and chemical indexes of 4 176 soil samples in the villages and towns were analyzed, and the soil fertility was evaluated with the method of fuzzy comprehensive evaluation. We aimed to provide a scientific basis for the rational use of local cultivated land. The results showed that: (1) the soil nutrient status of cultivated land in Huzhu County was good, and the quality grade of each index was at the first three levels; (2) pH of cultivated land decreased by 5.20% due to the long-term use of acid compound fertilizer; long-term tillage resulted in fertility consumption, and the consumed elements were not replenished in time, resulting in a 9.69% reduction in SOM content; TK decreased by 32.02%; soil C/N ratio decreased by 27.28%; (3) the fertility of cultivated soil in Huzhu County showed a trend of low in southwest and high in northeast; the comprehensive soil fertility index increased by 5.77%, which was caused by the increase of nitrogen and phosphorus elements, and there was a risk of environmental pollution; (4) in the following tillage process, attention should be paid to the addition of organic fertilizer and potassium fertilizer, straw return to the field, broad beans and other crops rotation, little or no application of phosphorus fertilizer in order to reduce the risk of environmental pollution, and ensure good tillage environment and sustainable growth of crops.

收稿日期:2021-07-06

修回日期:2021-08-20

资助项目:第二次青藏高原综合科学考察研究(2019QZKK0603)

第一作者:邓晓倩(1996—),女,四川德阳人,硕士研究生,主要从事水土保持研究和耕地土壤肥力评价。E-mail:911836553@qq.com

通信作者:安韶山(1972—),男,宁夏固原人,博士,研究员,博士生导师,主要从事植被恢复与土壤质量评价、土壤微生物多样性、土壤结构与碳固定研究。E-mail:shan@ms.iswc.ac.cn

**Keywords:** soil nutrient; cultivated land fertility; fuzzy comprehensive evaluation; temporal and spatial variation; Huzhu, Qinghai

陆地生态系统中,土壤养分对植物生长和养分循环具有重要的调节作用<sup>[1]</sup>。土壤碳、氮、磷和钾是生态系统中植物生长和生产的主要竞争性营养资源<sup>[2]</sup>。我国“十三五”规划提出了现代农业发展的“耕地储粮、减肥增效”国家战略。耕地储粮是指通过培育土壤质量,提高土壤肥力,实现粮食稳定高产<sup>[3]</sup>。在耕作过程中,随着时间的推移,农村的经营制度、耕作制度、有机肥和化肥施用总量与作物种植结构发生了变化<sup>[4]</sup>,耕地土壤肥力也会相应发生变化。土壤肥力决定作物的生长和产出,进而决定土地生产力和可持续性<sup>[5]</sup>。均衡施肥或有机无机肥料配施是维持作物高产、稳产的有效措施,施用化肥过少或过量都会引起土壤质量及生产力下降<sup>[6]</sup>。土壤肥力是衡量耕地质量的重要指标,与作物的生长状况有着密切的关系,土壤肥力评价能综合评价土壤的基本肥力状况,为作物的生长提供科学的理论指导。在现有评价方法中,常用土壤C、N、P来分析土壤养分情况,或直接将大田产量作为衡量土壤肥力的标准<sup>[7]</sup>。近年来,学者将聚类分析、因子分析和模糊数学应用于土壤肥力的综合评价<sup>[8-9]</sup>,其中模糊数学的方法可以通过隶属度描述土壤养分指标的渐变性和模糊性<sup>[10]</sup>,由于可操作性强、评价结果准确可靠,许多学者在评价土壤肥力时用到该方法<sup>[11-14]</sup>。

互助土族自治县是全国唯一的土族自治县<sup>[15]</sup>,总土地面积3 423.9 km<sup>2</sup>,2019年农业收入占各类产值总收入的59.89%,农业是当地居民收入的主要来源。互助县是青海省重要农业区,改善土壤,科学耕作以提高作物产量对提高当地居民的收入至关重要。自2007年全国第二次土壤调查以来,互助县农业技术推广中心每年进行采样分析,监测土壤理化指标的变化,本文在此基础上,研究互助县自2007年以来耕地中各养分指标的变化,用模糊综合评价的方法对土壤肥力进行评价,为耕地的合理耕种提出建议,对探究耕地可持续耕作、提高作物产量具有一定意义。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

互助土族自治县(101°46′—102°45′E, 36°30′—37°09′N)是青海省海东市下辖县,位于青海省东部、海东市北部,北倚祁连山脉达坂山,与门源回族自治县相连,东北与甘肃省天祝藏族自治县和永登县毗邻,东南与乐都区接壤,西临大通县<sup>[16]</sup>,总面积3 423.9 km<sup>2</sup>,包含19个乡镇,294个村庄,总人口40.17万人<sup>[17]</sup>。互助县地

处青藏高原和黄土高原的过渡地带祁连山东段南麓。地势北高南低,最高点为巴扎藏族乡的北沟脑岭,海拔4 484 m,最低点在高寨镇的曹家堡村,海拔2 200 m,县境地势起伏,高差悬殊,“三横三纵”的平行岭谷纵横交错<sup>[18]</sup>。县境内无湖泊,有大小天然河流8条,均属黄河流域、湟水水系,全长2 895 km,青石岭自西北向东南贯穿全境,把全县自然地分为两大地形单元。互助土族自治县属大陆寒温带气候,冬季受西伯利亚季风和寒流影响,夏季受东南沿海台风影响。年均温5.8℃,极端最高气温为30.3℃,极端最低气温为-26.9℃;年日照时数为2 581.7 h,无霜期114 d,年降水量477.4 mm,年蒸发量1 198.3 mm,年相对湿度63%,年平均风速0.9 m/s,雷暴日数39 d。

### 1.2 数据获取与分析

本研究的数据来源于互助县农业技术推广中心,样点位置见图1,土壤指标包括pH值、土壤有机质(Soil organic matter, SOM)、全氮(Total nitrogen, TN)、碱解氮(Available nitrogen, AN)、全磷(Total phosphorus, TP)、有效磷(Available phosphorus, AP)、全钾(Total potassium, TK)和速效钾(Available potassium, AK)。采样深度为0—20 cm的土壤耕层,将每个土样混合均匀,室内风干、过筛后进行测定,测定方法为土壤农化分析中常用方法<sup>[19]</sup>。

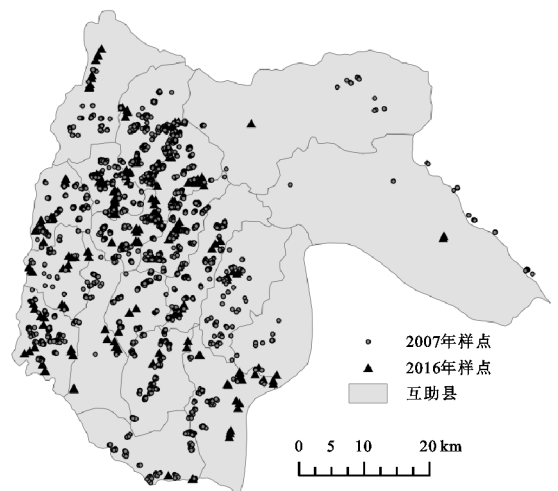


图1 研究区样点分布情况

### 1.3 统计分析

1.3.1 分析软件 首先将数据在SPSS中进行检验,验证其是否符合正态分布。由于数据量大,为了提高数据的准确度,采用3倍标准差法对数据进行初步筛选。用IBM SPSS 24进行数据分析,用Origin 2007及ArcGIS 10.1绘图。

1.3.2 土壤综合肥力指数 在土壤综合肥力指数的计算中,本研究中选用相关系数法确定土壤肥力指标权重,采用模糊数学综合评价法<sup>[10]</sup>,该评价法使用隶属函数表征指标肥力状况。具体步骤:1) 选取肥力指标与隶属函数;2) 确定隶属函数的转折点;3) 确定指标权重;4) 计算土壤肥力综合指数。

(1) 选取肥力指标与隶属函数。在土壤 pH,SOM,TN,AN,TP,AP,TK,AK 8 个指标中,由于各指标的量纲不同,没有可比性,故而引入隶属函数将指标归一化。隶属函数是评价指标与作为生长效应曲线相关关系的数学表达式,有“S”型(1)和“抛物线”型函数(2)两种类型<sup>[8]</sup>。由于 SOM,TN,AN,TP,AP,TK,AK 这类养分指标在一定范围内增大时,其对肥力的贡献增大,低于和高于一定范围,其贡献率维持在低水平和高水平,符合 S 型曲线的特征<sup>[20]</sup>,故这些指标使用“S”型函数。pH 值适用于“抛物线”型函数,这类评价因素对作物的生长发

育都有一个最适宜范围,超过此范围,偏离程度越大对作物的生长发育越不利<sup>[21]</sup>。

$$f(x)=\begin{cases}1.0 & x\geq x_2 \\ 0.9(x-x_1)/(x_2-x_1)+0.1 & x_1\leq x<x_2 \\ 0.1 & x<x_1\end{cases}\tag{1}$$

$$f(x)=\begin{cases}0.9(x_4-x)/(x_4-x_3)+0.1 & x_3\leq x\leq x_4 \\ 1.0 & x_2\leq x<x_3 \\ 0.9(x-x_1)/(x_2-x_1)+0.1 & x_1\leq x<x_2 \\ 0.1 & x<x_1\text{ 或 }x>x_4\end{cases}\tag{2}$$

式中: $f(x)$ 为某指标的隶属度; $x$ 为该指标实测值; $x_1,x_2,x_3,x_4$  分别对应该指标的隶属函数转折点。

(2) 确定隶属函数的转折点。结合全国第二次土地调查相关标准<sup>[22]</sup>及互助县耕地土壤特性,确定隶属函数转折点见表 1。

表 1 隶属函数转折点

转折点	酸碱度 pH	有机质/ (g·kg <sup>-1</sup> )	全氮/ (g·kg <sup>-1</sup> )	碱解氮/ (mg·kg <sup>-1</sup> )	全磷/ (g·kg <sup>-1</sup> )	有效磷/ (mg·kg <sup>-1</sup> )	全钾/ (g·kg <sup>-1</sup> )	速效钾/ (mg·kg <sup>-1</sup> )
$x_1$	4.5	6	0.5	60	1	5	10	30
$x_2$	6	40	2	120	2	20	25	200
$x_3$	7							
$x_4$	8.5							

(3) 确定指标权重。权重是各评价因子对土壤肥力的重要性,权重越大,表明该评价指标对土壤肥力的影响越大,重要性越高。本研究采用相关分析法确定权重<sup>[23-25]</sup>。在相关性分析中,由于数据并不符合正态分布,采用斯皮尔曼相关系数进行分析。先求出单项肥力指标之间的相关系数,再求某项肥力指标与其他肥力指标之间相关系数的平均值( $\bar{x}_i$ ),通过相关系数的平均值得到土壤肥力指标的权重系数  $w_i$ ,计算公式:

$$w_i=\bar{x}_i/\sum\bar{x}_i\tag{3}$$

式中: $w_i$  是第  $i$  项土壤肥力指标的权重系数; $\bar{x}_i$  表示某项肥力指标与其他肥力指标之间相关系数的平均值, $\sum\bar{x}_i$  表示所有肥力指标相关系数平均值总和。

(4) 计算土壤肥力综合指数。

$$IFI=\sum(q_i\times w_i)\tag{4}$$

式中: $q_i$ 是第  $i$  项土壤肥力指标的隶属度; $w_i$  是第  $i$  项土壤肥力指标的权重系数;IFI 值在 0~1 之间,值越大,表明土壤肥力质量越好<sup>[24]</sup>。

2 结果与分析

2.1 互助县耕地土壤养分状况描述性统计

由图 2 看出,2007 互助县耕地土壤偏碱性,pH

值为 7.00~9.20,平均值 8.03。SOM,TN,AN,TP,AP,TK 和 AK 的范围分别为 2.30~58.60 g/kg,0.33~3.49 g/kg,31.00~204.00 mg/kg,0.91~2.98 g/kg,1.8~51.5 mg/kg,9.40~36.70 g/kg,11.00~460.00 mg/kg;均值分别为 26.11 g/kg,1.90 g/kg,112.28 mg/kg,2.05 g/kg,17.78 mg/kg,22.79 g/kg,188.41 mg/kg;其中 pH 值属于小变异,TN,AN,TP 和 TK 属于中等变异,SOM,AP 和 AK 属于高等变异。结合全国第二次土壤普查土壤养分分级标准<sup>[22]</sup>,大部分样点的等级都在前三级。

2016 年,互助县耕地土壤偏碱性,pH 值为 7.00~8.40,平均值 7.69。SOM,TN,AN,TP,AP,TK 和 AK 的范围分别为 13.90~30.10 g/kg,0.90~3.65 g/kg,91.00~139.40 mg/kg,1.10~4.01 g/kg,2.90~50.30 mg/kg,2.00~28.30 g/kg,105.00~139.00 mg/kg;均值分别为 23.93 g/kg,2.36 g/kg,121.97 mg/kg,2.52 g/kg,25.02 mg/kg,14.82 g/kg,127.13 mg/kg;其中 pH,AN 和 AK 属于小变异,SOM,TN 和 TP 属于中等变异,AP 和 TK 属于高等变异。大部分样点的等级在前三级。

2.2 互助县 2007 年、2016 年各乡镇土壤养分基本状况

互助县共有 19 个乡镇,各个乡镇的土壤养分状

况不同。2007 年各乡镇 pH 值呈碱性,最小值 7.72 出现在台子乡,最大值 8.2 出现在西山乡;SOM 的最小值 16.16 g/kg 出现在蔡家堡乡,最大值 47.83 g/kg 出现在南门峡镇。由图 3 看出,SOM 的分布呈现出西南低,东北高的趋势;TN 的最小值 1.34 g/kg 出现在西山乡,最大值 2.89 g/kg 出现在巴扎乡,分布规律与 SOM 类似;AN 最小值 78.55 mg/kg 出现在西山乡,最大值 147.9 mg/kg 出现在巴扎乡;TP 的最

小值 1.66 g/kg 出现在蔡家堡乡,最大值 2.39 g/kg 出现在松多藏族乡,乡镇间分布无明显规律;AP 的最小值 6.77 mg/kg 出现在东和乡,最大值 29.59 mg/kg 出现在红崖子沟乡;TK 的最小值 18.40 g/kg 出现在台子乡,最大值 29.50 g/kg 出现在丹麻镇,乡镇间分布无明显规律;AK 的最小值 80.15 mg/kg 出现在南门峡镇,最大值 378.62 mg/kg 出现在哈拉直沟乡。

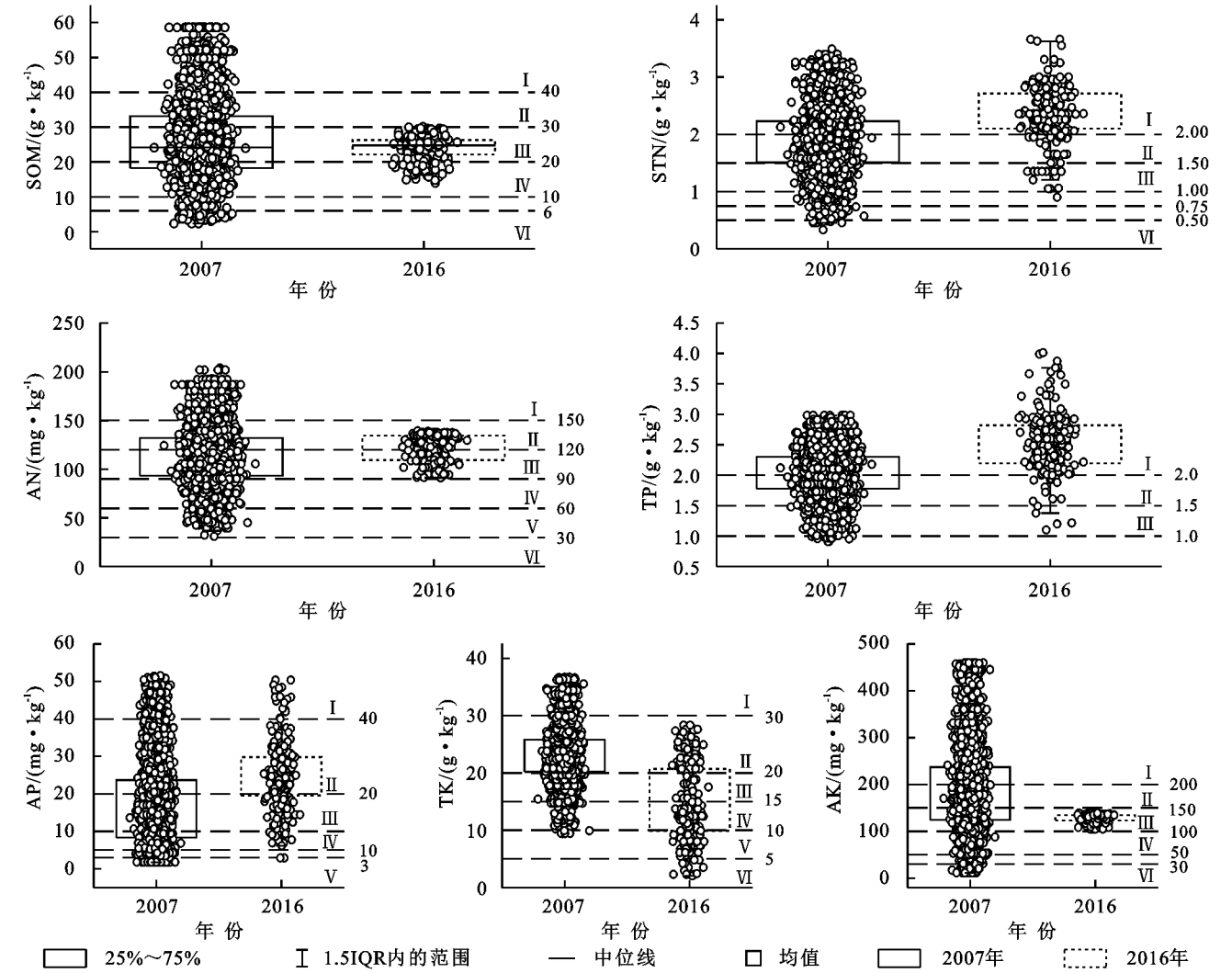


图 2 互助县耕地各指标箱线图及土壤质量等级

2016 年各乡镇 pH 最小值 7.3 出现在哈拉直沟乡,最大值 8.01 出现在威远镇;SOM 的最小值 19.70 g/kg 出现在哈拉直沟乡,最大值 26.23 g/kg 出现在东沟乡,与 2007 年的情况相似,SOM 的分布呈现出西南低,东北高的趋势;TN 的最小值 1.36 g/kg 出现在塘川镇,最大值 2.74 g/kg 出现在东和乡,分布规律与 SOM 类似;AN 最小值 110.14 mg/kg 出现在五十镇,最大值 135.50 mg/kg 出现在加定镇;TP 的最小值 2.09 g/kg 出现在塘川乡,最大值 2.93 g/kg 出现在哈拉直沟乡,乡镇间分布无明显规律;AP 的最小值 16.55 mg/kg 出现在东山

乡,最大值 31.30 mg/kg 出现在林川乡;TK 的最小值 7.94 g/kg 出现在西山乡,最大值 24.30 g/kg 出现在哈拉直沟乡,各乡镇的 TK 分布无明显规律;AK 的最小值 122.29 mg/kg 出现在红崖子沟乡,最大值 135.00 mg/kg 出现在哈拉直沟乡。

由图 4 看出,2007 年互助县各乡镇的碳氮比为 4.69~13.33,平均值 8.042,2016 年,碳氮比为 4.85~8.93,平均值 5.848。从 2007—2016 年,大部分乡镇的碳氮比都呈现出下降的趋势,仅有威远镇耕地的碳氮比上升了 2.7,所有乡镇平均下降了 2.194(27.28%)。



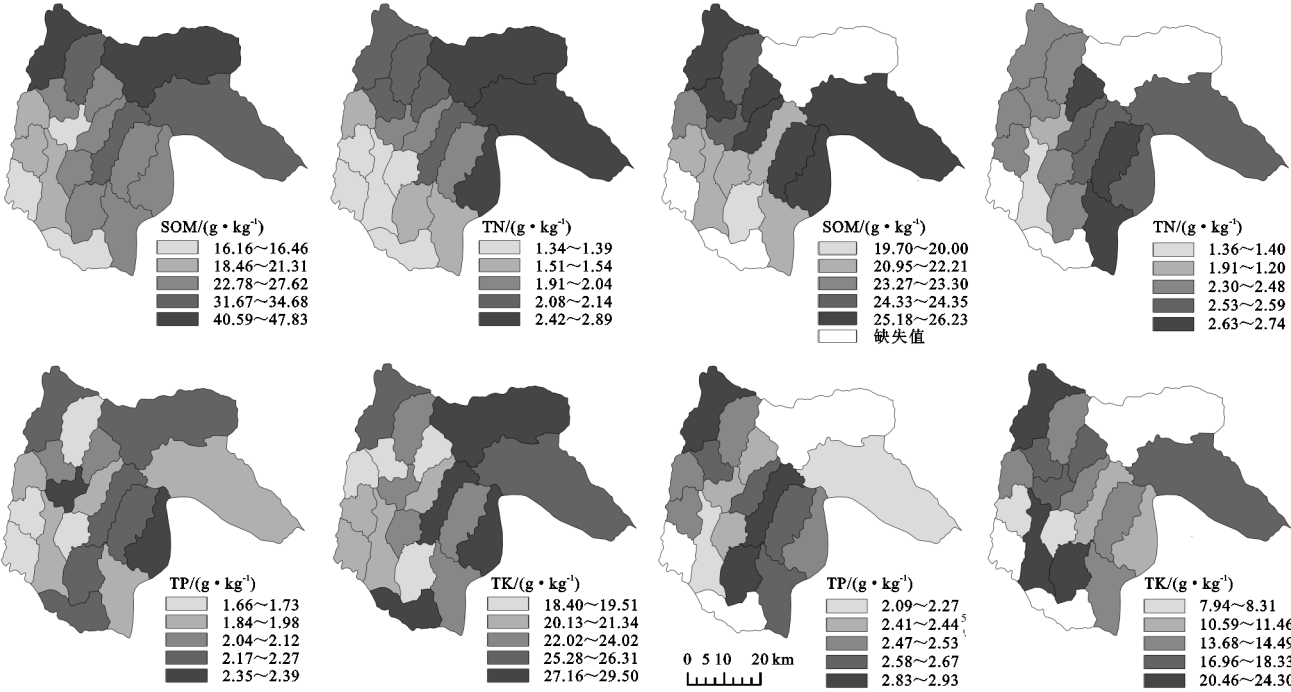


图 3 2007 年、2016 年互助县各乡镇 SOM,TN,TP,TK 情况

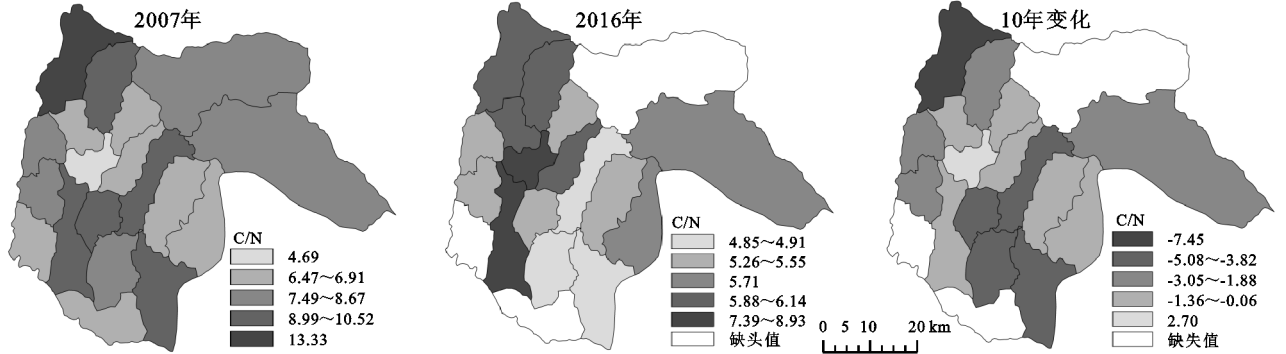


图 4 2007 年、2016 年互助县各乡镇土壤碳氮比

2.3 互助县 10 年耕地土壤养分的变化

2007—2016 年,互助县耕地土壤养分变化见图 5,土壤酸碱度变低,各乡镇的酸碱度降低 0.09~0.76,所有乡镇平均降低了 0.42。SOM, TK 和 AK 分别降低 0.06~22.65 g/kg, 0.22~18.045 g/kg, 16.203~243.615 mg/kg, 平均降低 2.51 g/kg, 7.389 g/kg, 63.87 mg/kg; TN, AN, TP 和 AP 分别增加 0.14~1.12 g/kg, 7.27~43.03 mg/kg, 0.02~0.76 g/kg, 3.21~20.17 mg/kg 平均增加 0.52 g/kg, 10.92 mg/kg, 0.50 g/kg, 6.67 mg/kg。土壤肥力指数在这 10 年中呈现增加的趋势,其中降低的乡镇有 6 个,降低的值为 0.001~0.075,增加的乡镇有 10 个,增加的值为 0.039~0.238,所有乡镇在 10 年中平均增加 0.047。

在 10 年的耕作中,耕地酸碱度降低了 0.418 (5.20%);SOM 处于被消耗的状态,SOM 的含量降低了 2.509 g/kg(9.69%),TN 处于积累的过程中,含量增加了 0.516 g/kg(27.45%),TP 处于积累的过程,含量增加了

0.498 g/kg(24.41%),TK 处于消耗的过程,含量降低了 7.389 g/kg(32.02%)。在后续的耕作过程中,应注重有机肥和钾肥的添加,尤其是丹麻镇。

2.4 互助县耕地土壤肥力评估

各指标隶属度的雷达图可以直接反映单一指标的肥力水平,平均隶属度越大,指标的肥力水平越高。图 6 为互助县 2007 年、2016 年耕地个肥力指标所对应的平均隶属度雷达图值,其中,2007 年和 2016 年的 TN, AN, TP, AP 的平均隶属度较高,均在 0.800 以上,2007 年的 pH 和 2016 年的 TK 平均隶属度较低,均在 0.500 以下,其他肥力指标介于这两个值之间。从 2007—2016 年, pH, TN, AN, TP, AP 的平均隶属度均有明显的上升,而 TK 和 AK 的平均隶属度明显下降,这表明在这 10 年中,全县耕地土壤的碱性情况有明显的改善, TN, AN, TP, AP 的肥力水平有所提高,而 TK 和 AK 的肥力水平有所下降,在后续的耕作过程中,应注重钾肥的添加。

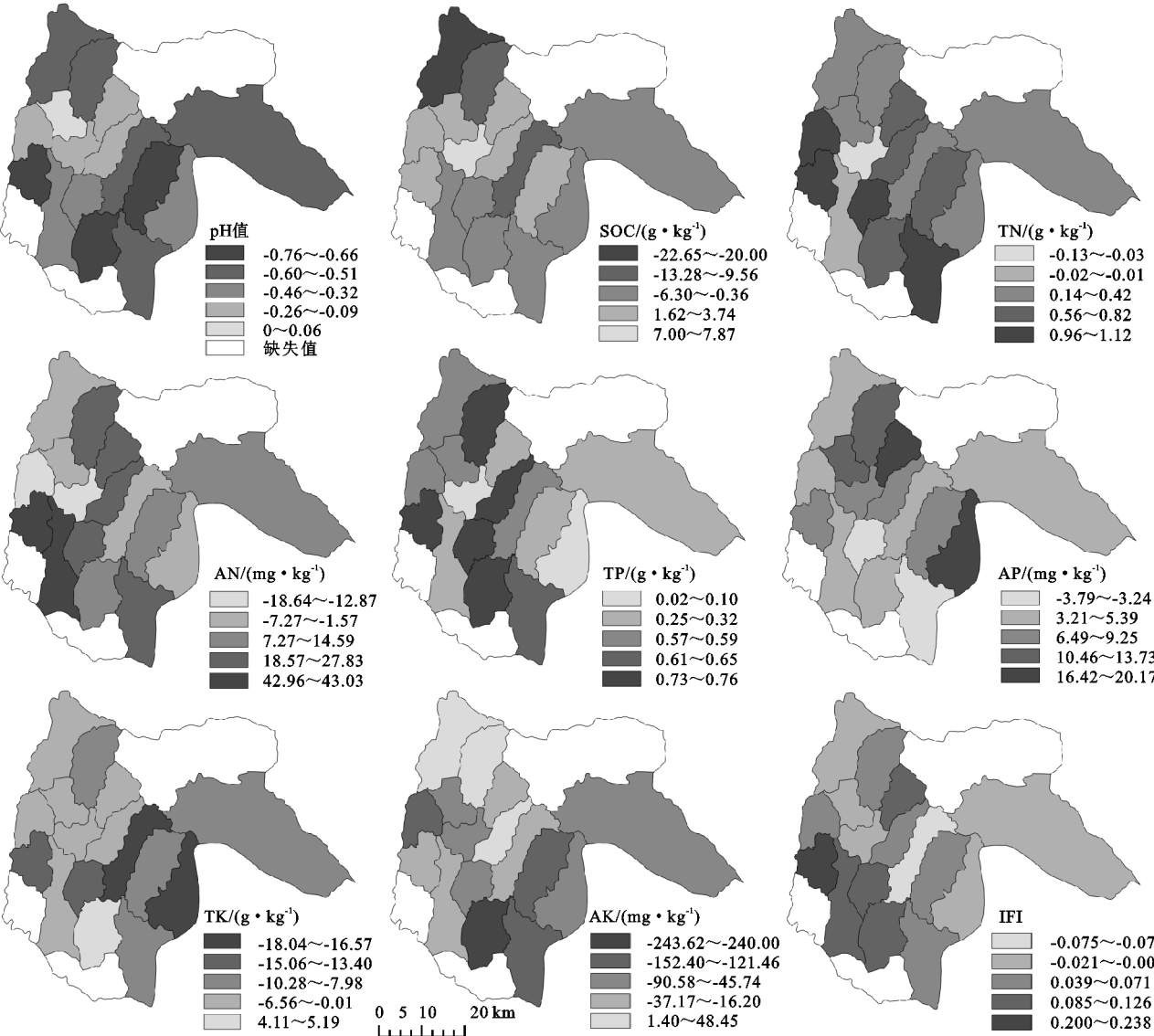


图 5 2007—2016 年互助县耕地土壤各养分变化

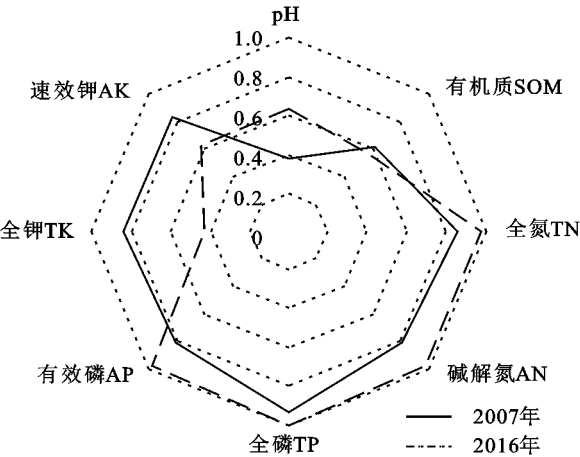


图 6 各肥力指标平均隶属度雷达图

从图 7 互助县各乡镇土壤肥力指数可以看出, 2007 年各乡镇土壤肥力的值为 0.581~0.915, 平均值 0.763, 各乡镇的肥力指数分布呈现西南低, 东北高的趋势。2016 年各乡镇土壤肥力的值为 0.731~0.848, 平均值 0.807。2007—2016 年, 土壤肥力指数

整体呈现出增加的趋势, 增加的值为 0.039~0.238, 但在南门峡镇、台子乡、威远镇、丹麻镇、加定镇、松多藏族乡 6 个乡镇出现了降低的情况, 降低的值为 0.001~0.075, 其中以丹麻镇降低 0.075 下降的最多, 所有乡镇在 10 年中平均增加了 0.044(5.77%)。

2.5 2007 年、2016 年各指标关系

如表 2 所示, 在 2007 年各指标的主成分分析中, 各养分指标间相关性显著, 除了 AN 和 AP, AN 和 TK, TP 和 AP, 以及 AP 和 TK, 其他养分指标的相关性均达到极显著级别。而在 2016 年各养分指标之间的关系中(表 3), SOM 与 TN, AN, TK, AK 之间的相关性显著, TN 与 AP, TP 与 AP 之间的相关性显著。如表 4 所示, 2007 年, 前两个主成分的贡献率达到 73.45%, 由图 8 可知, 在前两个主成分中, AN 和 AP 的作用突出。2016 年, 前两个主成分的贡献率达到 79.43%, 由图 9 可知, 前两个主成分中, AK 和 AP 的作用突出。

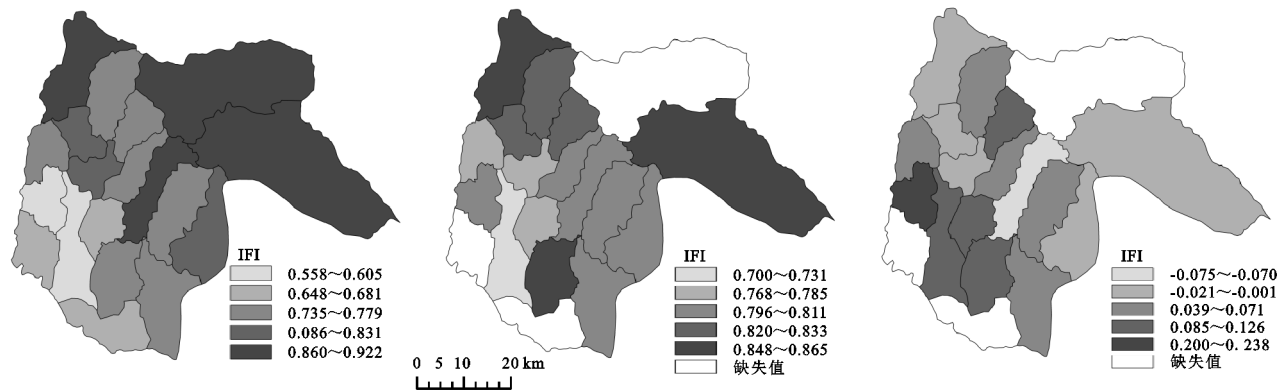


图 7 各乡镇土壤综合肥力指数

表 2 2007 年各指标斯皮尔曼相关性系数

指标	酸碱度 pH	有机质 SOM	全氮 TN	碱解氮 AN	全磷 TP	有效磷 AP	全钾 TK	速效钾 AK	肥力指数 IFI	碳氮比 C/N
酸碱度 pH	1.000									
有机质 SOM	−0.413 **	1.000								
全氮 TN	−0.327 **	0.371 **	1.000							
碱解氮 AN	−0.103 **	0.132 **	0.394 **	1.000						
全磷 TP	−0.109 **	0.099 **	0.372 **	0.334 **	1.000					
有效磷 AP	−0.076 **	0.081 **	−0.193 **	0.019	0.011	1.000				
全钾 TK	−0.097 **	0.255 **	0.186 **	0.028	0.057 **	−0.023	1.000			
速效钾 AK	0.056 **	−0.184 **	−0.117 **	0.081 **	0.168 **	0.222 **	−0.156 **	1.000		
肥力指数 IFI	−0.479 **	0.579 **	0.685 **	0.598 **	0.531 **	0.220 **	0.193 **	0.169 **	1.000	
碳氮比 C/N	−0.218 **	0.745 **	−0.257 **	−0.130 **	−0.147 **	0.236 **	0.143 **	−0.093 **	0.123 **	1.000

注：\*\*表示在 0.01 级别(双尾),相关性显著。

表 3 2016 年各指标斯皮尔曼相关性系数

指标	酸碱度 pH	有机质 SOM	全氮 TN	碱解氮 AN	全磷 TP	有效磷 AP	全钾 TK	速效钾 AK	肥力指数 IFI	碳氮比 C/N
酸碱度 pH	1.000									
有机质 SOM	0.109	1.000								
全氮 TN	−0.035	0.206 **	1.000							
碱解氮 AN	0.019	0.168 *	0.081	1.000						
全磷 TP	0.016	0.074	0.117	−0.022	1.000					
有效磷 AP	0.062	0.031	0.167 *	−0.074	0.162 *	1.000				
全钾 TK	0.073	0.302 **	0.019	0.115	0.013	0.070	1.000			
速效钾 AK	−0.064	−0.144 *	0.046	0.106	0.122	−0.091	−0.093	1.000		
肥力指数 IFI	−0.465 **	0.396 **	0.310 **	0.376 **	0.154 *	0.177 *	0.496 **	0.062	1.000	
碳氮比 C/N	0.091	0.473 **	−0.667 **	0.065	−0.071	−0.142 *	0.225 **	−0.152 *	0.028	1.000

注：\*\*表示在 0.01 级别(双尾),相关性显著。\*表示在 0.05 级别(双尾),相关性显著。

表 4 主成分分值贡献率

年份	2007 年				2016 年			
	1	2	3	4	1	2	3	4
特征值	0.618	0.117	0.103	0.070	0.632	0.163	0.089	0.035
累积贡献率/%	61.790	73.450	83.730	90.690	63.180	79.430	88.320	91.840

3 讨论

3.1 土壤养分空间变化特征及原因

互助县土壤养分呈现出西南低、东北高的特点。肥力大小的差异是自然成土因素和人为活动长期作用的结果<sup>[26-28]</sup>,由于成土母质、气候、生物、地形以及

土地利用方式等在空间尺度上的不同,导致了土壤肥力状况在空间上的变化<sup>[29]</sup>。互助县耕地成土母质主要为黄土和黑土,土壤类型以黑钙土、栗钙土、潮土和高山草甸土为主,成土母质和土类是造成土壤养分空间变化的根本原因,通常,成土母质为黑土的土壤 SOM 高于成土母质为黄土的土壤。互助县种植作物

为小麦、青稞、马铃薯、蚕豆等,其中蚕豆因其大且多的根瘤被誉为“生物固氮之王”,种植蚕豆可减少因大量施用化肥而造成的水资源的污染和土壤结构破坏,还可改良土壤肥力<sup>[30]</sup>,建议在耕作过程中将蚕豆与其他作物轮作,从而改善土壤环境。

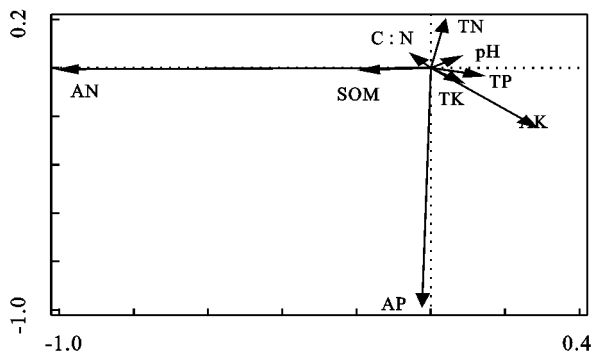


图 8 2007 年各样点 PCA 分析

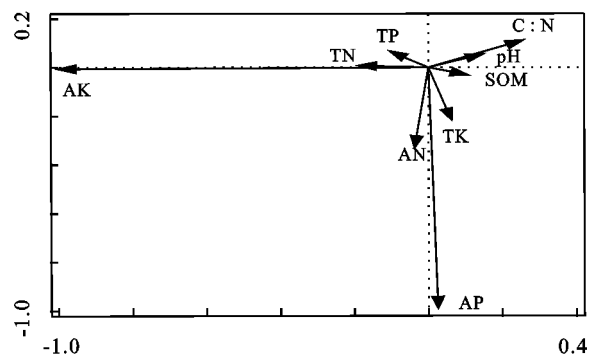


图 9 2016 年各样点 PCA 分析

互助县以小农经济为主,由于认识水平、家庭经济能力的不同,施肥习惯存在明显的差异,这是造成耕地肥力情况不同的主要原因。2019 年,青海省推行“有机肥替代化肥”<sup>[31]</sup>,在此之前,当地的肥料以尿素、二铵和复合肥等为主,施肥量和肥料配施存在明显区别。在南门峡镇、台子乡、威远镇、丹麻镇、松多藏族乡 5 个乡镇中,氮肥的施加不到位,导致土壤肥力水平的下降。在后续的耕作活动中,应当注重钾肥的添加,南门峡镇、台子乡、威远镇、丹麻镇、松多藏族乡 5 个乡镇在注重钾肥添加的同时,应注重氮肥和有机肥的添加。

3.2 土壤养分年份变化特征及原因

10 年来,土壤的酸碱度降低,这与张水生<sup>[32]</sup>和白建忠等<sup>[4]</sup>的研究结果相同。土壤酸碱度是土壤的一项重要属性,对作物的生长有一定的影响,根据第二次普查农田肥力数据库,互助县耕地土壤的 pH 值为 7.9~8.9,因耕作过程中长期使用酸性复合肥<sup>[32-33]</sup>,耕地平均酸碱度降低明显。酸碱度变化太大会对作物产生负面影响,所以在日后耕作过程中,要注意平衡土壤的酸碱度,使作物的生长环境良好。10 年来, SOM 的含量呈现出下降的趋势,随之下降的是土壤碳氮比,一般情况下,耕层的碳氮比在 8 : 1~15 : 1 之

间<sup>[34]</sup>,互助县的碳氮比明显偏低,且 10 年间下降至 5.848,这与当地农民的耕种习惯密切相关。土壤 TN 和 AN 均呈现出增加趋势,为增加产量,不断施加氮肥,逐年积累,使得氮素的收支处于盈余的状态,多余的氮素被土壤吸附固定,造成土壤的氮含量增加。磷肥的施用能改善土壤有效磷水平,随着施入土壤中的磷肥迅速增加,而植物对施入土壤中的磷肥当季利用率只有 5%~15%<sup>[35-36]</sup>,绝大部分的磷积累于土壤中,造成磷在土壤中的富集,当累积超过一定限度,磷可通过径流、渗透、淋溶等途径向水体迁移,对水体环境产生危害<sup>[37]</sup>,还可能降低土壤中碳储量<sup>[38]</sup>。建议后续耕作活动中,减少磷肥的使用,降低环境污染的风险。

耕作过程中,轻钾肥,重氮、磷肥,且存在轻基肥重追肥的情况。科学施肥应当重视基肥的施加,确定合适的基肥追肥比例,提高肥料利用率。作为基肥,氮肥、磷肥和钾肥的比例应当分别控制在 60%~70%,100%和 50%;作为追肥,氮肥控制在 30%~40%,钾肥控制在 50%<sup>[32]</sup>。10 年间钾肥的减少量高达 32.02%,一方面是因为农民在耕作过程中偏施氮、磷肥,少施或不施钾肥;另一方面是因为作物本身从土壤中带走的钾肥较多,投入和产出不平衡导致土壤钾素不断降低,因此在后续的耕作过程中,应注重钾肥的施加。过多过少的使用化肥都不利于土壤养分补充和粮食生产,确保作物需求量和施肥量之间的养分平衡才是改善土壤性质的必要条件<sup>[39]</sup>。

4 结 论

互助县的耕地土壤养分状况整体较好,单个指标质量等级均在前三级。由于长期使用酸性复合肥,耕地酸碱度降低 5.20%;长期耕种导致耕地肥力消耗,消耗的元素不及时补充,使得 SOM 含量降低 9.69%;TK 降低 32.02%;土壤碳氮比降低 27.28%。互助县耕地土壤的肥力情况呈现西南低,东北高的趋势。土壤综合肥力指数上升 5.77%,主要是氮、磷元素升高引起,存在环境污染的风险。在后续的耕作过程中,应注重有机肥和钾肥的添加,秸秆还田,蚕豆与其他作物轮作,少施或不施磷肥,降低环境污染风险,确保耕作环境良好,作物可持续生长。

参考文献:

[1] Sistla S A, Schimel J P. Stoichiometric flexibility as a regulator of carbon and nutrient cycling in terrestrial ecosystems under change [J]. New Phytologist, 2012, 196 (1): 68-78.

[2] Craine J M, Dybzinski R. Mechanisms of plant competi-



- tion for nutrients, water and light [J]. *Functional Ecology*, 2013, 27(4): 833-840.
- [3] 沈仁芳, 王超, 孙波. “藏粮于地、藏粮于技”战略实施中的土壤科学与技术问题[J]. *中国科学院院刊*, 2018, 33(2): 135-144.
  - [4] 白建忠, 李存保, 牛继成, 等. 青铜峡市耕地养分现状、变化趋势及评价[J]. *宁夏农林科技*, 2008, 51(6): 55-56.
  - [5] Marco M, Linus K M., William B, et al. Soil fertility and land sustainability in Usangu Basin-Tanzania [J]. *Heliyon*, 2021, 7(8): e07745.
  - [6] 朱兆良, 金继运. 保障我国粮食安全的肥料问题[J]. *植物营养与肥料学报*, 2013, 19(2): 259-273.
  - [7] 杜景龙, 陈德超, 王兆华. GIS支持下的土壤综合肥力指标的定量计算[J]. *土壤肥料*, 2005, 42(2): 17-20.
  - [8] 孙波, 张桃林, 赵其国. 我国东南丘陵山区土壤肥力的综合评价[J]. *土壤学报*, 1995, 32(4): 362-369.
  - [9] 张兴昌. 土壤肥力的数学评价初探[J]. *陕西农业科学*, 1993, 39(4): 8-11.
  - [10] 王建国, 杨林章, 单艳红. 模糊数学在土壤质量评价中的应用研究[J]. *土壤学报*, 2001, 38(2): 176-183.
  - [11] 李娟, 刘国顺, 宋晓华. 重庆烟区土壤养分状况分析及综合评价[J]. *江西农业学报*, 2009, 21(7): 94-96, 99.
  - [12] 严珺, 孙海, 蒋桑, 等. 桓仁地区林下参土壤肥力评价[J]. *特产研究*, 2018, 40(2): 1-7, 18.
  - [13] 赵蛟, 徐梦洁, 庄舜尧, 等. 基于模糊综合评价法的建瓯市毛竹林地土壤肥力评价[J]. *土壤通报*, 2018, 49(6): 1428-1435.
  - [14] Santos W P D, Silva M L N, Avanzi J C, et al. Soil quality assessment using erosion-sensitive indices and fuzzy membership under different cropping systems on a Ferralsol in Brazil [J]. *Geoderma Regional*, 2021, 25: e00385.
  - [15] 青海省地方志编纂委员会编. 青海年鉴[M]. 西宁: 青海人民出版社, 2017.
  - [16] 李万寿主编. 海东市“十三五”水资源可持续利用规划[M]. 兰州: 甘肃文化出版社, 2018.
  - [17] 互助土族自治县地方志编纂委员会编. 互助土族自治县年鉴[M]. 西安: 陕西人民美术出版社, 2019.
  - [18] 互助土族自治县志编纂委员会编. 互助土族自治县志[M]. 西宁: 青海人民出版社, 1993.
  - [19] 南京农学院主编. 土壤农化分析[M]. 北京: 农业出版社, 1980.
  - [20] 周王子, 董斌, 刘俊杰, 等. 基于权重分析的土壤综合肥力评价方法[J]. *灌溉排水学报*, 2016, 35(6): 81-86.
  - [21] 王建庆, 冯秀丽, 项璐. 基于模糊数学法的滩涂围垦区土壤肥力特征评价[J]. *宁波大学学报: 理工版*, 2013, 26(4): 101-106.
  - [22] 全国土壤普查办公室编. 中国土壤普查技术[M]. 北京: 农业出版社, 1992.
  - [23] 曹婧, 陈怡平, 毋俊华, 等. 黄河流域五大灌区沿河耕地土壤肥力评价与改良措施[J]. *地球环境学报*, 2020, 11(2): 204-214.
  - [24] 郑立臣, 宇万太, 马强, 等. 农田土壤肥力综合评价研究进展[J]. *生态学杂志*, 2004, 23(5): 156-161.
  - [25] Chen S, Lin B, Li Y, et al. Spatial and temporal changes of soil properties and soil fertility evaluation in a large grain-production area of subtropical plain, China [J]. *Geoderma*, 2020, 357: 113937.
  - [26] 刘冬碧, 熊桂云, 胡时友, 等. 不同利用方式下土壤的养分特性及其变异性初探[J]. *湖北农业科学*, 2003, 42(6): 51-55.
  - [27] 王小利, 苏以荣, 黄道友, 等. 土地利用对亚热带红壤低山区土壤有机碳和微生物碳的影响[J]. *中国农业科学*, 2006, 39(4): 750-757.
  - [28] 沈仁芳, 陈美军, 孔祥斌, 等. 耕地质量的概念和评价与管理对策[J]. *土壤学报*, 2012, 49(6): 1210-1217.
  - [29] 陈小梅, 姚玉才, 章明奎. 浙东海积平原耕地土壤肥力特征及空间变化规律研究[J]. *土壤通报*, 2016, 47(3): 618-623.
  - [30] 贾腾飞, 张小娟. 蚕豆根瘤菌生物地理学及 AFLP 多样性分析[J]. *分子植物育种*, 2019, 17(20): 6860-6866.
  - [31] 潘彬彬. 为青海省实现全域有机肥替代化肥助力[EB/OL]. 2019-03-19/2021-07-01.
  - [32] 张水生. 耕地养分的变化与施肥技术的改进[J]. *福建农业*, 2010, 71(11): 11.
  - [33] Daniel K W, Milu M, Thomas J. Can economic and environmental benefits associated with agricultural intensification be sustained at high population densities? A farm level empirical analysis [J]. *Land Use Policy*, 2019, 81: 100-110.
  - [34] 贾文锦. 辽宁土壤[M]. 沈阳: 辽宁科学技术出版社, 1992.
  - [35] 王璐, 姜英君, 王红霞, 等. 呼伦贝尔市耕地土壤磷素富集空间变异研究[J]. *中国农技推广*, 2018, 34(10): 62-65.
  - [36] 王永壮, 陈欣, 史奕. 农田土壤中磷素有效性及影响因素[J]. *应用生态学报*, 2013, 24(1): 260-268.
  - [37] 詹秋丽, 张黎明, 周碧青, 等. 福建耕地土壤磷素富集空间差异及其影响因素[J]. *中国生态农业学报*, 2018, 26(2): 274-283.
  - [38] Stiles W A V, Rowe E C, Dennis P. Long-term nitrogen and phosphorus enrichment alters vegetation species composition and reduces carbon storage in upland soil[J]. *Science of the Total Environment*, 2017, 593: 688-694.
  - [39] Hanrahan B R, King K W, Williams M R, et al. Nutrient balances influence hydrologic losses of nitrogen and phosphorus across agricultural fields in northwestern Ohio [J]. *Springer Netherlands*, 2019, 113(3): 231-245.