

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2023.06.013.

宋淑钧, 崔小茹, 陈雄, 等. 休耕对陇中旱农区农田土壤养分的影响[J]. 水土保持研究, 2023, 30(6): 143-150, 159.

Song Shujun, Cui Xiaoru, Chen Xiong, et al. Effects of Fallow on Soil Nutrients in the Dryland Farming Area of Central Gansu[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2023, 30(6): 143-150, 159.

休耕对陇中旱农区农田土壤养分的影响

宋淑钧^{1,2}, 崔小茹³, 陈雄⁴, 陈其鲜³, 杨荣¹, 尤艳蓉³

(1.中国科学院 西北生态环境资源研究院 临泽内陆河流域研究站, 兰州 730000; 2.中国科学院大学, 北京 100049; 3.甘肃省农业技术推广总站, 兰州 730000; 4.定西市安定区农业技术推广中心, 甘肃 定西 743000)

摘要: [目的] 评估休耕对农田土壤养分的影响, 阐明休耕模式的适宜性, 为区域制定合理的土地管理措施和提高农田土壤质量提供科学依据。 [方法] 以陇中旱农区农田为研究对象, 基于 2017—2019 年连续 3 a 的休耕试验数据, 选择土壤有机质(SOM)、全氮(TN)、有效磷(AP)、速效钾(AK)、pH 值和交换性钙、镁 7 个土壤养分指标, 对比绿肥种植休耕模式实施前后土壤养分的变化情况以及休耕与非休耕对照(马铃薯—玉米—马铃薯轮作)土壤养分的差异。 [结果] (1) 与休耕前的基础养分相比, 休耕 3 a 后, SOM, TN 和 AK 含量均有增加趋势, 增幅依次为 19.5%, 23.0%, 9.2%, 其中除 AK 外, SOM 和 TN 含量休耕前后均有显著差异 ($p < 0.05$); AP, pH 值和交换性钙、镁均显著降低 ($p < 0.05$), 降幅依次为 21.8%, 1.0%, 36.5%, 39.6%。(2) 与非休耕对照相比, SOM, TN 和 AK 含量分别明显高于对照区 3.5%, 11.0%, 8.5%, AP 和交换性钙含量均比对照区低, 其中仅 TN 和交换性钙的含量有显著差异 ($p < 0.05$)。(3) AP 变化率与其基础含量呈显著对数关系 ($p < 0.001$), SOM, TN, AK, pH 值等指标变化率与其基础含量之间均呈显著的负相关性函数关系 ($p < 0.01$), 即随着土壤基础养分的增加休耕对其养分变化的影响降低, 而交换性钙镁的这种关系不显著。(4) 休耕 3 a 后 SOM, TN, AK 和 AP 之间均呈显著正相关关系 ($r > 0.38$, $p < 0.05$); pH 值除与交换性镁的相关性不显著, 与其他土壤养分指标均呈显著负相关关系 ($p < 0.01$), 且休耕区上述土壤养分指标的相关性均比对照区高。 [结论] 采用种植绿肥的休耕模式, 可使陇中旱农区耕地质量得到一定程度的提升, 并且对基础养分较低的土壤效果更佳。但 3 a 的休耕相较于马铃薯—玉米—马铃薯轮作种植地力提升幅度较小, 表明在较短的时间尺度内休耕对土壤的改良作用仍十分有限。

关键词: 休耕; 农田土壤; 土壤养分; 耕地质量; 陇中旱农区

中图分类号: S156; S158.3

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2023)06-0143-08

Effects of Fallow on Soil Nutrients in the Dryland Farming Area of Central Gansu

Song Shujun^{1,2}, Cui Xiaoru³, Chen Xiong⁴, Chen Qixian³, Yang Rong¹, You Yanrong³

(1. Linze Inland River Basin Research Station, Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. Gansu General Station of Agrotechnology Extension, Lanzhou 730000, China; 4. An' ding District Center of Agricultural Technology Extension in Dingxi City, Dingxi, Gansu 743000, China)

Abstract: [Objective] The aims of this study are to evaluate the effects of fallow on soil nutrients in farmland, clarify the suitability of fallow patterns, and provide a scientific basis for developing appropriate land management measures and improving the quality of soils in this area. [Methods] Based on the fallow trial data of three consecutive years from 2017 to 2019, seven soil nutrient indexes, including soil organic matter

收稿日期: 2022-10-21

修回日期: 2022-11-08

资助项目: 农业农村部科技支撑项目“甘肃省旱作区耕地休耕养地技术试验研究与示范”(GNCX-2016-1); 农业农村部耕地轮作休耕制度试点项目; 国家生态科学数据中心开放基金(NESDC20210103)

第一作者: 宋淑钧(2001—), 女, 山西忻州人, 硕士研究生, 研究方向为寒旱区水土资源。E-mail: songshujun@nieer.ac.cn

通信作者: 杨荣(1979—), 男, 甘肃武威人, 博士, 研究员, 主要从事农业生态学 research。E-mail: yangrong@lzb.ac.cn

<http://stbcyj.paperonce.org>

(SOM), total nitrogen (TN), available phosphorus (AP), available potassium (AK), pH value, exchangeable calcium and exchangeable magnesium, were selected to compare the changes in soil nutrients before and after the implementation of the fallow mode of green manure cultivation and the differences in soil nutrients between fallow and non-fallow controls (potato-corn-potato rotation) by using farmland in the dryland farming area of central Gansu as the research object. [Results] (1) Compared with the basic nutrients before fallow, the contents of SOM, TN and AK showed the increasing trend after three years of fallow, increasing by 19.5%, 23.0% and 9.2%, respectively, in which there were significant differences ($p < 0.05$) in the contents of SOM and TN before and after fallow, except for AK; AP, pH value, and exchangeable calcium and magnesium significantly decreased by 21.8%, 1.0%, 36.5% and 39.6%, respectively ($p < 0.05$). (2) Compared with the non-fallow control, the contents of SOM, TN and AK were 3.5%, 11.0% and 8.5% higher than those in the control area, respectively. AP and exchangeable calcium were lower than those in the control area. However, there were significant differences only in the contents of TN and exchangeable calcium ($p < 0.05$). (3) There was a significant logarithmic relationship between the rate of change of AP and its basic content ($p < 0.001$), and a significant negative linear function between the rate of change of SOM, TN, AK and pH value and their basic content ($p < 0.01$). In other words, the effect of fallow on change of soil nutrients decreased with the increase of its basic nutrients, but this relationship was not significant for exchangeable calcium and exchangeable magnesium. (4) After three years of fallowing, there were remarkable positive correlations among SOM, TN, AK and AP ($r > 0.38$, $p < 0.05$). The pH value was significantly negatively correlated with other soil nutrient indexes except exchangeable magnesium ($p < 0.01$). The correlation of soil nutrient indexes in the fallow area was higher than that in the control area. [Conclusion] The fallow mode of green manure planting can improve the quality of cultivated land in the dryland farming area of central Gansu to some extent, and it is more effective for soils with low basic nutrients. However, the three-year fallow is less effective than the potato-maize crop-potato rotations, indicating that the improvement effect of fallow on soil is still limited in a relatively short time scale.

Keywords: fallow; farmland soil; soil nutrient; cultivated land quality; dryland farming area of central Gansu

耕地是粮食安全的基本保障^[1],然而由于人类不合理的利用^[2],我国部分地区耕地质量逐渐降低,致使土壤养分含量发生变化^[3],造成土壤污染、生态环境退化,对耕地环境与粮食安全构成极大威胁^[4]。因此,加快推进耕地的治理修复工作,改善农田土壤环境,提高耕地质量成为近年来的研究热点^[1,5]。休耕是提高土壤肥力从而实现改良耕地质量的有效措施^[6-7],在美国^[8]、欧盟^[9-10]和日本等^[11]发达国家均有实施。2016年,国务院颁布《探索实行耕地轮作休耕制度试点方案》及后续出台相关文件,对试点工作展开全面部署,并自此在我国多个省(区)开展休耕试点工作^[12]。在此背景下研究休耕对农田土壤养分的影响,对区域提出有针对性的休耕模式从而提高土壤肥力、改善耕地质量和促进农业可持续发展具有重要意义。

近年来,关于休耕的研究主要集中在实行休耕制度存在的问题与实施现状^[1,6-7,12]、休耕政策农户响应态度和行为^[13-14]以及休耕的模式及效应等^[15-16]方面。其中,关于休耕模式及效应研究在地下水漏斗

区、重金属污染区、西南喀斯特生态脆弱区、西北生态严重退化区四大典型试点区域均展开调研^[1]。赵其国等^[17]发现河北省石家庄、衡水、沧州等深层地下水漏斗区采用苜蓿—冬小麦—夏玉米等休耕轮作下休耕两年后,土壤有机质提高 8.6%,土壤全氮、速效磷、速效钾含量平均提高 15.8%,作物产量提高 26.5%,具有显著的节水、节肥、节药效果。黄毅等^[18]调查发现长沙、株洲等重金属镉、锰超标地区休耕模式治理两年后,大面积水稻的镉含量达标,土壤酸化得到有效缓解,生态环境得到极大改善。刘彦伶等^[4]发现贵州省、云南省等西南石漠化区实行轮作休耕有效减少土壤侵蚀,采用间套作轮作技术使得地表植物覆盖度大幅提高。高飞等^[19]调查发现甘肃省河西土壤沙化、盐渍化严重的古浪县和东北部严重干旱的环县等 9 个县连续 3 a 休耕后,土壤有机质和全氮等养分含量均表现为增加的趋势,土壤肥力得到初步恢复,耕地质量等级提升 0.09 等。尽管关于休耕对农田土壤养分影响的研究已开展很多,但在陇中旱农区相关研

究报道仍比较少。

陇中旱农区农田土壤由于马铃薯多年连作,加之地力培肥不当,造成农田土壤退化,直接影响农业产业结构、农田产出水平及农产品质量。为使土壤得到修复,通过开展休耕试点,从而实现改良土壤、地力提升的效果,但是目前该区域针对休耕措施实施效果尚需数据支持。因此,本研究以陇中旱农区为研究对象,基于在2017—2019年对该区开展连续3 a的休耕试点工作,通过对休耕前后土壤养分的变化情况及不同种植模式土壤养分含量的差异对比分析,开展休耕对陇中旱农区农田土壤养分的影响研究,并对已开展的休耕试点工作进行有效的评估,以期为区域探索适宜的休耕模式和制定合理的土地管理措施以提高旱农区农田土壤质量提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于甘肃省陇中旱农区中段安定区($35^{\circ}17'—36^{\circ}02'N$, $104^{\circ}12'—105^{\circ}01'E$),隶属于甘肃省定西市,海拔1 700~2 580 m,总土地面积 $3.6 \times 10^5 \text{ hm}^2$,其中耕地面积 $1.5 \times 10^5 \text{ hm}^2$ 。该区属陇中黄土梁峁沟壑区,是典型大陆性气候,属中温带干旱半干旱区,年平均气温 6.3°C ,年平均日照时数 2 500 h, $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 有效积温 $2\,239.1^{\circ}\text{C}$,无霜期 130 d 左右,多年平均降水量 400 mm,有效降水量少,暴雨径流多,雨量多集中在7—9月。地势从西南山地向东北丘陵倾斜,山地下部为小型内官营盆地,丘陵之间为河流切割形成的沟谷阶地。土壤类型分为黑垆土、灰钙土、黄绵土和潮土4个类型。该区是一个以种植业为主的典型旱作雨养农业区,农作物种植以马铃薯和玉米为主。

休耕试点区安排在安定区北部马铃薯种植相对集中、多年连作现象突出和土地流转集中的石泉、青岚山、葛家岔、称钩驿、岷口、鲁家沟、白碌7个乡镇37村实施。在试点区域内平均 66.67 hm^2 耕地设立一个固定监测点,每个监测点面积 $2\,000 \text{ m}^2$ 左右,共建立休耕监测点41个,并在每个休耕监测点周边选择当地常规种植作物两种(马铃薯和玉米)设置对照监测点。休耕监测点自2017—2019年实施休耕,休耕期间以绿肥种植替代常规农作物的种植,绿肥选择毛苕子和箭筈豌豆混播,每 666.67 m^2 其播种量分别为1.5 kg和5 kg,对照监测点采用马铃薯—玉米—马铃薯的轮作种植模式。这种混作模式是该区域推荐的较优化的绿肥种植模式,这两种绿肥作物在西北

地区较为常见,具有固氮作用的豆科作物减少对土壤中氮素的吸收量,且可以将一定量的氮素转移给其他作物,可以把不能直接利用的氮气固定转化为作物可吸收利用的氮肥,是能够实现供肥配肥和绿色生产的优良豆科绿肥作物。绿肥播种前及时翻耕,盛花期深翻还田,所有监测点内每 666.67 m^2 增施商品有机肥 50 kg,其中有机质 $\geq 40.0\%$, $N+P_2O_5+K_2O \geq 5\%$ 。

1.2 土壤监测数据

本研究的数据来自“甘肃省旱作区耕地休耕养地技术试验研究与示范”和农业部“耕地轮作休耕制度试点”项目监测数据。在建立的休耕及对照监测点内,按照“随机”“等量”和“多点混合”的原则,分别在休耕前后采集监测点及对照点耕层(0—20 cm)土壤样品,休耕前的土壤样品于2017年3月下旬—4月上旬采集完成,休耕后的土壤样品于2019年最后一季作物收获后采集。样品分析在甘肃省有色金属地质勘探局兰州矿产勘查院中心实验室完成,采用常规分析方法^[20]分析土壤有机质(SOM)、全氮(TN)、有效磷(AP)、速效钾(AK)、pH值和交换性钙、镁等指标。

1.3 数据处理

对土壤养分数据进行描述性统计和正态分布检验。采用t检验比较休耕前后以及不同种植模式土壤养分的差异显著性,其中对服从正态分布的指标进行配对样本t检验(paired-samples t test),不服从正态分布的指标进行非参数检验中配对样本威尔科克森符号秩检验(Wilcoxon signed rank test),显著性水平以 $p < 0.05$ 表示。计算休耕前后各土壤养分指标的变化率,并对各养分指标变化率按照明显增加、基本不变和明显降低进行频数统计。土壤基础养分对休耕效果的影响采用回归法分析,对休耕前土壤基础养分与休耕后各土壤养分指标变化幅度进行拟合,确定两者间的关系。用Pearson相关系数评价土壤养分指标之间的相关关系。采用Microsoft Excel 2019,SPSS 26.0和Origin 2021软件进行数据处理、统计分析和作图。

2 结果与分析

2.1 区域土壤养分含量描述性统计分析

对监测土壤养分含量总体进行描述统计分析,结果显示(表1),SOM含量范围介于 $4.10 \sim 32.48 \text{ g/kg}$,平均值为 12.21 g/kg ,变异系数为 38.13% ,偏度系数和峰度系数分别为1.37,2.63。TN、AP、AK、交换性钙和交换性镁分别在 $0.30 \sim 2.20 \text{ g/kg}$, $0.60 \sim 50.64 \text{ mg/kg}$, $83.06 \sim 385.17 \text{ mg/kg}$, $35.25 \sim 60.81 \text{ cmol/kg}$ (+),

1.51~7.63 cmol/kg(+)范围内变动,平均值分别为 77.84%,38.44%,22.63%,41.19%。pH 值在8.16~0.82 g/kg,10.86 mg/kg,173.12 mg/kg,44.37 cmol/kg 9.13 范围内变动,平均值为 8.62,变异系数为1.74%,(+),3.22 cmol/kg(+),变异系数分别为 37.43%,偏度系数和峰度系数分别为-0.24,1.52。

表1 土壤养分含量指标的描述性统计($n=123$)Table 1 Descriptive statistics of the indexes of soil nutrient contents($n=123$)

指标	最小值	最大值	均值	标准差	变异系数/%	偏度	峰度
pH 值	8.16	9.13	8.62	0.15	1.74	-0.24	1.52
有机质/(g·kg ⁻¹)	4.10	32.48	12.21	4.66	38.13	1.37	2.63
全氮/(g·kg ⁻¹)	0.30	2.20	0.82	0.31	37.43	1.23	2.57
有效磷/(mg·kg ⁻¹)	0.60	50.64	10.86	8.46	77.84	2.14	5.83
速效钾/(mg·kg ⁻¹)	83.06	385.17	173.12	66.55	38.44	1.13	0.79
交换性钙/[cmol·kg ⁻¹ (+)]	35.25	60.81	44.37	10.04	22.63	0.70	-1.48
交换性镁/[cmol·kg ⁻¹ (+)]	1.51	7.63	3.22	1.33	41.19	1.07	0.53

2.2 休耕对土壤养分含量的影响

总体来看,休耕3 a后,土壤养分中SOM、TN和AK含量均增加,而AP、pH值和交换性钙、镁含量均降低。经正态性检验,土壤pH值服从正态分布,因此对休耕前后土壤pH值进行配对样本均值差异性检验,其他指标进行配对样本非参数检验。结果表明(表2),除AK以外,休耕前后SOM、TN、AP、土壤pH值和交换性钙、镁含量均存在显著差异($p<0.05$),其中交换性钙镁的变化极显著($p<0.001$)。休耕前SOM平均含量为10.94 g/kg,休耕后增加到13.07 g/kg,增幅为19.5%;休耕前TN平均含量为0.74 g/kg,休耕后增加到0.91 g/kg,增幅为23.0%;同样,AK由休耕前的167.63 mg/kg增加到休耕后的183.06 mg/kg,增加了15.43 mg/kg,增幅为9.2% ($p>0.05$)。进一步比较各监测点休耕前后养分变化频率(表3),休耕后51.2%的监测点SOM明显增加,63.4%TN明显增加,51.2%AK明显增加。休耕前土壤AP平均含量由11.97 mg/kg,休耕后降低到9.36 mg/kg,降幅为21.8%;土壤pH值平均值由8.68降低到8.59,降幅为1.0%;休耕后交换性

钙含量发生显著降低,降幅为36.5%,交换性镁降幅为39.6%,以上4项指标分别有63.4%,56.1%,100.0%,92.7%的监测点休耕后明显降低。

休耕和非休耕对照比较结果表明(表2),SOM、TN、AK、pH值和交换性镁含量均比对照区高,AP和交换性钙均比对照区低。经正态性检验,土壤pH值服从正态分布,因此对不同种植模式下的土壤pH值进行配对样本均值差异性检验,其他指标进行配对样本非参数检验。结果表明(表2),绿肥种植休耕模式与基于马铃薯和玉米轮作种植的当地传统模式之间只有TN和交换性钙的含量有显著差异($p<0.05$),而其余土壤养分指标含量差异均不显著($p>0.05$)。其中休耕监测区TN平均含量为0.91 g/kg,对照区平均含量为0.82 g/kg,休耕区比对照区高11.0%;休耕监测区交换性钙平均含量为37.10 cmol/kg(+),对照区平均含量为37.58 cmol/kg(+),休耕区比对照区低1.3%;休耕区SOM、AK、pH值和交换性镁平均含量分别比对照区高3.5%,8.5%,0.1%,3.1%,AP平均含量比对照区低16.9%。

表2 休耕前后及不同种植模式土壤养分含量t检验结果($n=41$)Table 2 The t-test results of soil nutrient contents before and after planting green manure of fallow and in different planting patterns($n=41$)

指标	均值±标准差			t 值	
	休耕区(2017年)	休耕区(2019年)	对照区(2019年)	休耕前后	不同种植模式
pH 值	8.68±0.15	8.59±0.14	8.58±0.14	2.91**	0.72
有机质/(g·kg ⁻¹)	10.94±2.92	13.07±5.64	12.63±4.82	-2.09*	-0.58
全氮/(g·kg ⁻¹)	0.74±0.25	0.91±0.36	0.82±0.29	-2.70**	-2.03*
有效磷/(mg·kg ⁻¹)	11.97±8.36	9.36±6.39	11.26±10.18	-2.08*	-0.24
速效钾/(mg·kg ⁻¹)	167.63±59.85	183.06±75.42	168.66±63.92	-1.07	-0.92
交换性钙/[cmol·kg ⁻¹ (+)]	58.45±0.98	37.10±0.95	37.58±1.01	-5.58***	-2.72**
交换性镁/[cmol·kg ⁻¹ (+)]	4.41±1.25	2.67±0.98	2.59±0.82	-5.27***	-0.24

注:***代表 $p<0.001$; **代表 $p<0.01$; *代表 $p<0.05$ 。

表 3 休耕前后土壤养分含量变化频率
Table 3 Statistics of variable amplitude frequency of soil nutrient contents before and after fallow in the pilot area %

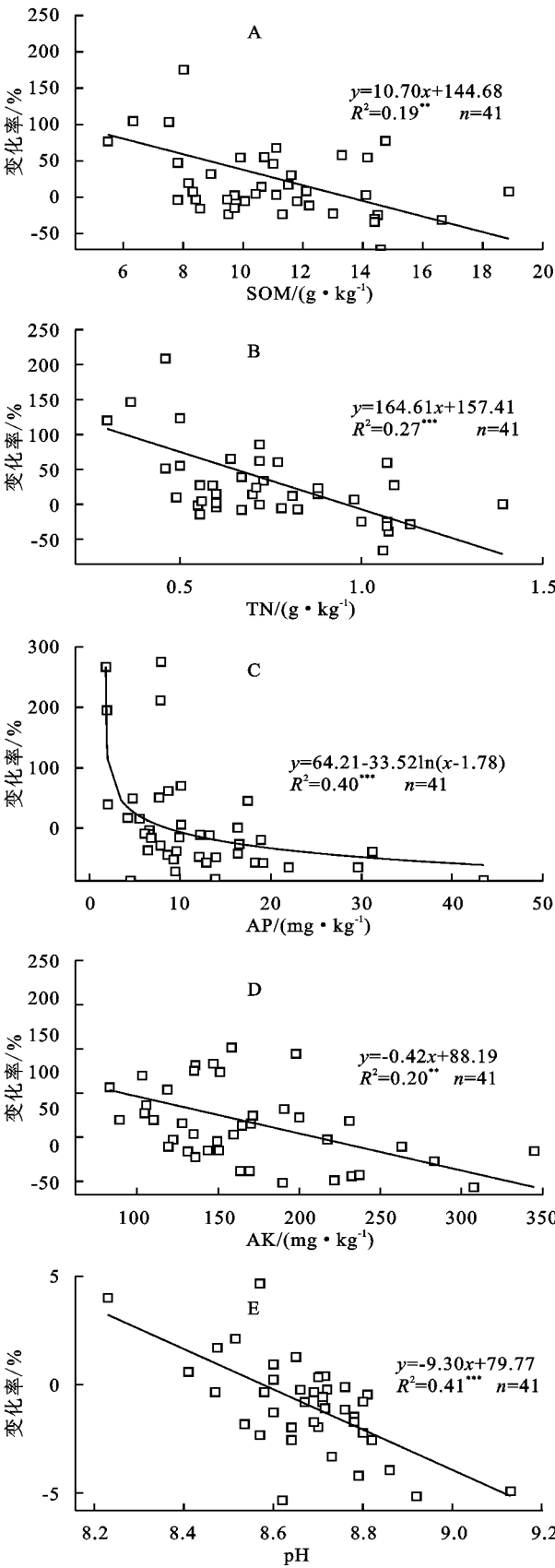
指标	休耕前后变化频率		
	明显增加	基本不变	明显降低
pH 值	17.1	26.8	56.1
有机质	51.2	22.0	26.8
全氮	63.4	9.8	26.8
有效磷	31.7	4.9	63.4
速效钾	51.2	12.2	36.6
交换性钙	0.0	0.0	100.0
交换性镁	2.4	4.9	92.7

2.3 基础养分对休耕后养分变化幅度的影响

将各养分指标休耕后的变化幅度与休耕前的基础值之间分别采用线性、乘幂、指数、对数、二项式模型进行拟合,结果如图 1 所示。除交换性钙镁,其他各养分指标休耕后的变化幅度均与基础养分呈显著关系,其中 AP 呈对数关系($R^2=0.40, p<0.001$), SOM, TN, AK 和 pH 值均呈线性关系($R^2=0.19, p<0.01, R^2=0.27, p<0.001, R^2=0.20, p<0.01, R^2=0.41, p<0.001$)。可以看出,各土壤养分指标的变化幅度都随基础含量的增加而降低,其中 SOM, TN, AK 和 pH 值的降低速率分别为 10.70, 164.61, 0.42, 9.30;当基础养分中 SOM, TN, AP 和 AK 各指标以及 pH 基础值分别大于 14 g/kg, 1.0 g/kg, 18 mg/kg, 160 mg/kg, 8.6 时,变化率为负值,表明休耕后养分含量减少。

2.4 土壤养分指标之间的关系

对休耕 3 a 后的休耕区和对照区各土壤养分指标进行相关分析,结果表明(表 4),试验区 SOM, TN, AP 和 AK 之间均呈显著正相关关系($r>0.38, p<0.05$),而对照区仅有 SOM 与 TN, AK 与 AP 之间有显著正相关关系($p<0.01$),Pearson 相关系数分别为 0.91, 0.63。休耕区和对照区 SOM 和 TN 与交换性钙均呈显著正相关关系($p<0.01$),与交换性镁均呈显著负相关关系($p<0.01$)。休耕区 SOM 除与交换性镁呈显著负相关关系($r=-0.43, p<0.01$),与 TN, AP, AK 以及交换性钙均呈显著正相关关系($p<0.01$),Pearson 相关系数分别为 0.99, 0.44, 0.52, 0.66。休耕区土壤 pH 值除与交换性镁的相关性不显著,与 SOM, TN, AP, AK 和交换性钙均呈显著负相关关系($p<0.01$),Pearson 相关系数分别为 -0.69, -0.67, -0.49, -0.43, -0.65,而对照区土壤 pH 值与 SOM, TN 和交换性钙呈显著负相关关系($p<0.01$),与交换性镁呈显著正相关关系($r=0.61, p<0.01$)。



注:SOM 表示土壤有机质;TN 表示全氮;AK 表示有效钾;AP 表示有效磷;n 表示样本数量。* 表示 $p<0.05$; ** 表示 $p<0.01$; *** 表示 $p<0.001$ 。

图 1 土壤基础养分与变化率之间的回归关系
Fig. 1 Regression relationship between soil basic nutrients and its rate of change

表 4 土壤养分指标之间的相关系数($n=41$)
Table 4 Correlation coefficients between soil nutrient indexes ($n=41$)

项目		pH 值	SOM	TN	AP	AK	交换性钙	交换性镁
pH 值	休耕区	1.00						
	对照区	1.00						
SOM	休耕区	-0.69**	1.00					
	对照区	-0.55**	1.00					
TN	休耕区	-0.67**	0.99**	1.00				
	对照区	-0.63**	0.91**	1.00				
AP	休耕区	-0.49**	0.44**	0.45**	1.00			
	对照区	-0.01	-0.001	0.08	1.00			
AK	休耕区	-0.43**	0.52**	0.54**	0.38*	1.00		
	对照区	-0.06	0.10	0.12	0.63**	1.00		
交换性钙	休耕区	-0.65**	0.66**	0.61**	0.10	0.23	1.00	
	对照区	-0.69**	0.74**	0.80**	-0.24	-0.13	1.00	
交换性镁	休耕区	0.28	-0.43**	-0.42**	-0.42**	0.08	-0.04	1.00
	对照区	0.61**	-0.34**	-0.55**	-0.05	0.06	-0.54**	1.00

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

3 讨论

土壤养分是耕地地力水平最直观的表现指标,通常地力水平随着其土壤养分含量的增加而提高^[21]。农田土壤养分的丰缺程度除受土壤成土母质本身的影响外,还与施肥及耕作制度等因素有着密切关系^[22]。已有许多研究表明^[6,12],休耕可以改良土壤、提升耕地质量。本研究发现实施 3 a 的休耕后,休耕区 SOM,TN 和 AK 含量分别提高 19.5%,22.6%,9.2%,可见休耕的确对土壤养分的提升起到有利的作用,这与其他研究的结果一致^[17,19,23]。SOM 是土壤中各种营养元素特别是氮、磷的重要来源,随着 SOM 含量的增加,土壤中有效性氮、磷和钾等营养元素的含量也随之增加^[24]。本研究中休耕使土壤各养分指标的提升主要原因是改变 SOM 状况,分析休耕对有机质含量的提升原因一方面是由于休耕后随着绿肥还田后通过翻压腐解,增加了土壤中有機物质以及微量元素等养分^[25],另一方面豆科作物具有固氮作用,可以把不能直接利用的氮气固定转化为作物可吸收利用的土壤养分元素。Pearson 相关分析表明,休耕区 SOM,TN,AP 和 AK 之间均呈显著正相关关系($p<0.01$),已有许多研究也证明这一结论^[3,26],并与对照区养分指标之间的相关分析对比发现,休耕同时增强上述土壤养分间的相关性。

土壤 pH 值是土壤的基本理化性质之一,是表征土壤养分状况的重要指标,对土壤养分的形成、转化、迁移和释放等均有显著的影响^[27]。本试验结果

表明,通过实施 3 a 休耕试点,试验区土壤 pH 值由 8.68 显著降低到 8.59,说明休耕使得试验区土壤碱性程度降低,其主要原因是通过 3 a 实施绿肥作物休耕种植,施肥方式转变,化肥施用量减少,从而调节土壤酸碱度,改良了碱性土壤。AK 含量有所增加也是由于休耕过程中随着土壤 pH 值下降,速效钾向缓效钾转换能力减弱,即土壤钾的固定能力减弱,因此速效钾含量有所升高。本研究中休耕前后 AP 含量显著降低($p<0.05$),这与赵其国等^[17]对河北省地下水漏斗区的研究结果不一致,这可能是由于休耕前研究区耕地的主要种植结构以及实施的休耕模式不同所致,本研究中休耕调整了试点区域耕地的主要种植结构,将粮食作物改种为绿肥作物,减少了化肥施用,但种植绿肥作物初期仍需要养分提供,如箭筈豌豆在生长过程中对土壤磷素消耗较多,因而导致部分养分含量降低。本研究还发现经休耕土壤交换性钙和交换性镁含量显著降低($p<0.001$),这可能是由于豆科绿肥作物根系分泌或翻压还田后腐解产生的较多有机酸性物质使土壤碱性程度降低的同时,加速交换性钙镁自耕作层向下淋溶,土壤阳离子交换性一定程度有所下降,有研究表明,当 pH 值升高到 7.5 以上时,土壤中原有交换性离子的含量一半以上转变成非交换态^[28],从而导致土壤中的交换性钙镁含量降低。

分析土壤基础养分对农田土壤休耕养分变化幅度的影响发现,土壤 SOM,TN,AP,AK 和 pH 值的变化幅度与休耕前土壤基础养分含量均呈显著负相关函数关系($p<0.01$),即各养分指标休耕后的变化

幅度随其基础含量的增加而降低,表明初始肥力较高的土壤休耕前后各养分指标变化幅度不大,甚至降低。可以看出,该研究区采用休耕的种植模式对基础养分较差的农田土壤有更好土壤养分提升效果。因此,实际生产中,应根据土壤初始地力水平的特性,有针对性地采取不同的休耕模式,以更好地发挥土地生产潜力,更高效合理地补充养分和维持土壤较高肥力水平^[29]。当然,休耕后土壤养分的变化幅度也可能受气候、土壤类型、水分状况等其他因素影响,这有待进一步研究证实。

研究区采用休耕模式在一定程度上提高了监测点土壤地力,但是与对照监测点相比,提升幅度较小。究其原因,主要可能是受到本研究休耕年限较短的影响,翻入土壤内的绿肥并未完全分解。这一结果也可能与所选用的休耕养地作物有关,有些作物在短期内休耕的效果就有所体现,而有些可能需要较长时间才可以达到相较种植传统作物模式下土壤肥力明显提升的效果,姜小凤等^[30]研究发现采用“陇豌2号”豌豆平衡土壤肥力休耕一季后土壤有机质和全氮含量显著高于种植一季马铃薯,而本研究采用毛苕子和箭筈豌豆两种豆科绿肥休耕,在短期内对土壤质量的提升有一定限度。土壤生态系统的性状提升和修复是一个长期的过程,因此,要实现区域农田土地肥力提升和土地可持续利用,需对该地区继续进行长期监测分析并对其休耕模式进一步探索,再进行休耕成效的判定。

4 结论

陇中旱农区农田土壤绿肥种植休耕模式实施3 a, SOM和TN平均含量分别显著提高19.5%,23.0%,AK平均含量提高9.2%,AP和交换性钙、镁含量显著降低,且土壤碱性程度降低;休耕区SOM,TN,AP和AK之间均呈显著正相关关系,土壤pH值除与交换性镁的相关性不显著,与SOM,TN,AP,AK和交换性钙均呈显著负相关关系,且均比对照区土壤养分间的相关性强;土壤养分休耕前后的变化幅度受土壤基础养分的影响,SOM,TN,AP,AK和pH值的变化幅度与休耕前土壤基础养分含量均呈显著负相关函数关系,采取绿肥种植休耕对基础养分较差的农田土壤更有提高地肥的效果;采用绿肥种植休耕模式一定程度提高农田土壤肥力,但相较于马铃薯—玉米—马铃薯轮作种植地力提升幅度较小,休耕在短期内对土壤质量的提升有一定限度。因此,适宜该区域改良土壤和培肥地力效果更好的休耕模式仍需继续探索,因地制宜确立适宜的休耕模式及土地管理策略是提高土壤肥力和促进农业可持续发展的关键措施。

参考文献:

- [1] 杨文杰,巩前文.国内耕地休耕试点主要做法、问题与对策研究[J].农业现代化研究,2018,39(1):9-18.
Yang W J, Gong Q W. Research on main practices, problems and countermeasures of domestic arable land fallow pilot[J]. Research of Agricultural Modernization, 2018,39(1):9-18.
- [2] 王芳,肖洪浪,苏永中,等.临泽边缘绿洲区盐化草甸开垦后土壤质量演变[J].中国沙漠,2011,31(3):723-727.
Wang F, Xiao H L, Su Y Z, et al. Evolution of soil quality after reclamation of saline meadow in Linze marginal oasis area[J]. Journal of Desert Research, 2011,31(3):723-727.
- [3] 杨玉海,陈亚宁,李卫红,等.准噶尔盆地西北缘新垦绿洲土地利用对土壤养分变化的影响[J].中国沙漠,2008,28(1):94-100.
Yang Y H, Chen Y N, Li W H, et al. Effects of land use on soil Nutrient change in newly reclaimed oasis in northwestern Junggar Basin [J]. Journal of Desert Research, 2008(1):94-100.
- [4] 刘彦伶,李渝,秦松,等.西南喀斯特生态脆弱区实行轮作休耕问题探讨:以贵州省为例[J].中国生态农业学报,2018,26(8):1117-1124.
Liu Y L, Li Y, Qin S, et al. Discussion on the implementation of fallow rotation in karst ecologically fragile areas in Southwest China: A case study of Guizhou Province[J]. Chinese Journal of Eco-agriculture, 2018, 26(8):1117-1124.
- [5] 陈文广,孔祥斌,廖宇波,等.黄土高原区耕地质量评价:以陕西省延川县为例[J].水土保持研究,2021,28(2):375-381.
Chen W G, Kong X B, Liao Y B, et al. Evaluation of cultivated land quality in loess plateau: A case study of Yanchuan county, Shaanxi Province [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2021,28(2):375-381.
- [6] 陈展图,杨庆媛.中国耕地休耕制度基本框架构建[J].中国人口·资源与环境,2017,27(12):126-136.
Chen Z T, Yang Q Y. Construction of basic framework of arable land fallow system in China [J]. China Population, Resources and Environment, 2017,27(12):126-136.
- [7] 朱国锋,李秀成,石耀荣,等.国内外耕地轮作休耕的实践比较及政策启示[J].中国农业资源与区划,2018,39(6):35-41,92.
Zhu G F, Li X C, Shi Y R, et al. Comparative study on the practice and policy implications of fallow rotation in cultivated land [J]. China Agricultural Resources and Regional Planning, 2018,39(6):35-41,92.
- [8] Shang F Z, Ren S M, Yang P L, et al. Effects of different fertilizer and irrigation water types, and dissolved

- organic matter on soil C and N mineralization in crop rotation farmland[J]. *Water, Air & Soil Pollution*, 2015, 226(12):1-25.
- [9] Fraser I, Stevens C. Nitrogen deposition and loss of biological diversity: Agricultural land retirement as a policy response[J]. *Land Use Policy*, 2008, 25(4):455-463.
- [10] Kizos T, Koulouri M, Vakoufaris H, et al. Preserving characteristics of the agricultural landscape through agri-environmental policies: The case of cultivation terraces in Greece[J]. *Landscape Research*, 2010, 35(6):577-593.
- [11] Ono K, Mano M, Han G H, et al. Environmental controls on fallow carbon dioxide flux in a single-crop rice paddy, Japan[J]. *Land Degradation & Development*, 2015, 26(4):331-339.
- [12] 赵其国, 滕应, 黄国勤. 中国探索实行耕地轮作休耕制度试点问题的战略思考[J]. *生态环境学报*, 2017, 26(1):1-5.
- Zhao Q G, Teng Y, Huang G Q. Strategic thinking on exploring the implementation of cultivated land rotation and fallow system in China[J]. *Journal of Eco-Environment*, 2017, 26(1):1-5.
- [13] Xie H, Cheng L, Lu H. Farmers' responses to the winter wheat fallow policy in the groundwater funnel area of China[J]. *Land Use Policy*, 2018, 73:195-204.
- [14] 谢花林, 程玲娟. 地下水漏斗区农户冬小麦休耕意愿的影响因素及其生态补偿标准研究: 以河北衡水为例[J]. *自然资源学报*, 2017, 32(12):2012-2022.
- Xie H L, Cheng L J. Study on influencing factors and ecological compensation standard of fallow willingness of farmers in groundwater funnel area: A case study in Hengshui, Hebei Province [J]. *Journal of Natural Resources*, 2017, 32(12):2012-2022.
- [15] 邓琳璐, 王继红, 刘景双, 等. 休耕轮作对黑土酸化的影响[J]. *水土保持学报*, 2013, 27(3):184-188.
- Deng L L, Wang J H, Liu J S, et al. Effect of fallow rotation on acidification of black soil[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2013, 27(3):184-188.
- [16] 苏康传, 杨庆媛, 张忠训, 等. 中国耕地差异化休耕模式及技术措施探讨[J]. *农业工程学报*, 2020, 36(9):283-291.
- Su K C, Yang Q Y, Zhang Z X, et al. Discussion on different fallow patterns and technical measures of cultivated land in China[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2020, 36(9):283-291.
- [17] 赵其国, 沈仁芳, 滕应, 等. 我国地下水漏斗区耕地轮作休耕制度试点成效及对策建议[J]. *土壤*, 2018, 50(1):1-6.
- Zhao Q G, Shen R F, Teng Y, et al. Results and countermeasures of the pilot system of cultivated land rotation fallow in the funnel area of groundwater in China[J]. *Soil Science*, 2018, 50(1):1-6.
- [18] 黄毅, 邓志英. 我国重金属污染区耕地轮作休耕存在的问题及对策: 以湖南省为例[J]. *环境保护*, 2019, 47(13):22-26.
- Huang Y, Deng Z Y. Existing problems and countermeasures of arable rotation and fallow in heavy metal polluted areas in China: Taking Hunan Province as an example[J]. *Environmental Protection*, 2019, 47(13):22-26.
- [19] 高飞, 崔增团, 贾蕊鸿, 等. 甘肃省休耕试点区域主要技术模式及实施效果[J]. *中国农学通报*, 2021, 37(20):93-97.
- Gao F, Cui Z T, Jia R H, et al. Main technical model and implementation effect of fallow pilot area in Gansu Province [J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2021, 37(20):93-97.
- [20] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- Bao S D. *Soil and Agricultural Chemistry Analysis*[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2000
- [21] 王寅, 李小坤, 李雅颖, 等. 红壤不同地力条件下直播油菜对施肥的响应[J]. *土壤学报*, 2012, 49(1):121-129.
- Wang Y, Li X K, Li Y Y, et al. Response of rapeseed to fertilization in red soil under different soil fertility conditions[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2012, 49(1):121-129.
- [22] 徐颖菲, 姚玉才, 章明奎. 全年淹水种植茭白对水田土壤性态的影响[J]. *土壤通报*, 2019, 50(1):15-21.
- Xu Y F, Yao Y C, Zhang M K. Effects of annual waterlogged bamboo shoots on soil properties in paddy fields[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2019, 50(1):15-21.
- [23] 黄国勤, 赵其国. 中国典型地区轮作休耕模式与发展策略[J]. *土壤学报*, 2018, 55(2):283-292.
- Huang G Q, Zhao Q G. Patterns and development strategies of crop rotation fallow in typical regions of China[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2018, 55(2):283-292.
- [24] 杨荣, 苏永中, 王敏, 等. 新垦沙地农田土壤有机碳时空变异特征[J]. *中国沙漠*, 2013, 33(4):1078-1083.
- Yang R, Su Y Z, Wang M, et al. Spatial and temporal variation of soil organic carbon in newly reclaimed sandy land[J]. *Journal of Desert Research*, 2013, 33(4):1078-1083.
- [25] 程利, 王晓玲, 胡玉敏, 等. 多伦县耕地土壤养分变化趋势分析及配方施肥研究[J]. *中国农学通报*, 2014, 30(15):146-151.
- Cheng L, Wang X L, Hu Y M, et al. Analysis of soil nutrient change trend and formula fertilization in Duolun County [J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2014, 30(15):146-151.

- Chinese Academy of Sciences and Ministry of Education), 2018.
- [20] 薛凯, 杨明义, 张凤宝, 等. 利用淤地坝泥沙沉积旋回反演小流域侵蚀历史[J]. 核农学报, 2011, 25(1): 115-120.
Xue K, Yang M Y, Zhang F B, et al. Investigating soil erosion history of a small watershed using sediment couplet in a dam[J]. Journal of Nuclear Agricultural Sciences, 2011, 25(1): 115-120.
- [21] 李勉, 杨剑锋, 侯建才, 等. 黄土丘陵区小流域淤地坝记录的泥沙沉积过程研究[J]. 农业工程学报, 2008, 24(2): 64-69.
Li M, Yang J F, Hou J C, et al. Sediment deposition process for a silt dam in a small watershed in Loess Hilly Region[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2008, 24(2): 64-69.
- [22] Blagodatskaya E, Kuzyakov Y. Mechanisms of real and apparent priming effects and their dependence on soil microbial biomass and community structure: critical review[J]. Biology and Fertility of Soils, 2008, 45(2): 115-131.
- [23] Zhu Z. Stoichiometric regulation of priming effects and soil carbon balance by microbial life strategies[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2022, 169, doi:10.1016/j.soilbio.2022.108669.
- [24] 黄双双, 霍常富, 解宏图, 等. 表层和下层免耕黑土有机碳矿化速率及激发效应[J]. 应用生态学报, 2019, 30(6): 1877-1884.
Huang S S, Huo C F, Xie H T, et al. Soil organic carbon mineralization and priming effects in the topsoil and subsoil under no-tillage black soil[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2019, 30(6): 1877-1884.
- [25] Lu M K, Xie J S, Wang C, et al. Forest conversion stimulated deep soil C losses and decreased C recalcitrance through priming effect in subtropical China[J]. Biology and Fertility of Soils, 2015, 51(7): 857-867.
- [26] Blagodatskaya, E. V, Blagodatsky, S. A, Anderson, T. H., et al. Priming effects in Chernozem induced by glucose and N in relation to microbial growth strategies[J]. Applied Soil Ecology, 2007, 37(1-2): 95-105.
- [27] Wang H, Boutton T W, Xu W H, et al. Quality of fresh organic matter affects priming of soil organic matter and substrate utilization patterns of microbes[J]. Scientific Reports, 2015, 5(1): 10102.
- [28] 张天霖, 蔡章林, 赵厚本, 等. ¹³C 脉冲标记法研究非正常凋落物对土壤有机碳的激发效应[J]. 生态环境学报, 2021, 30(9): 1797-1804.
Zhang T L, Cai Z L, Zhao H B, et al. Priming effect on soil organic carbon by abnormal litter following ¹³C pulse-labeling[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2021, 30(9): 1797-1804.
- [29] Maier M, Schack-Kirchner H, Hildebrand E E, et al. Soil CO₂ efflux vs. soil respiration: Implications for flux models[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2011, 151(12): 1723-1730.
- [30] Wordell-Dietrich P, Wotte A, Rethemeyer J, et al. Vertical partitioning of CO₂ production in a forest soil[J]. Biogeosciences, 2020, 17(24): 6341-6356.
- [31] 赵佳玉, 肖薇, 张弥, 等. 通量梯度法在温室气体及同位素通量观测研究中的应用与展望[J]. 植物生态学报, 2020, 44(4): 305-317.
Zhao J Y, Xiao W, Zhang M, et al. Applications and prospect of the flux-gradient method in measuring the greenhouse gases and isotope fluxes[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2020, 44(4): 305-317.

(上接第 150 页)

- [26] Yang R, Su Y, Yang Q. Crop yields and soil nutrients in response to long-term fertilization in a desert oasis[J]. Agronomy Journal, 2015, 107(1): 83-92.
- [27] 李易麟, 南忠仁. 开垦对西北干旱区荒漠土壤养分含量及主要性质的影响: 以甘肃省临泽县为例[J]. 干旱区资源与环境, 2008, 22(10): 147-151.
Li Y L, Nan Z R. Effects of reclamation on Nutrient contents and main properties of desert soil in arid areas of Northwest China: A case study of Linze County, Gansu Province[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2008, 22(10): 147-151.
- [28] Barber S A. Soil Nutrient Bioavailability: A Mechanistic Approach[M]. New York: John Wiley & Sons, 1985.
- [29] 鲁艳红, 廖育林, 聂军, 等. 连续施肥对不同肥力稻田土壤基础地力和土壤养分变化的影响[J]. 中国农业科学, 2016, 49(21): 4169-4178.
Lu Y H, Liao Y L, Nie J, et al. Effects of continuous fertilization on soil basal fertility and soil nutrients in paddy fields with different fertility[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2016, 49(21): 4169-4178.
- [30] 姜小凤, 郭凤霞, 陈垣, 等. 休耕和种植作物对黑麻土壤肥力的影响[J]. 水土保持学报, 2021, 35(1): 229-235.
Jiang X F, Guo F X, Chen Y, et al. Effects of fallow and planting crops on soil fertility of black hemp[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2021, 35(1): 229-235.