

DOI:10.13870/j.cnki.stbxb.2024.05.009

张梦月,张钊玮,杨毅轩,等.黄土塬区不同土地利用方式对土壤理化性质的影响[J].水土保持学报,2024,38(5):192-202.

ZHANG Mengyue,ZHANG Zhaowei,YANG Yixuan,et al.Effects of different land use patterns on soil physicochemical properties in the Loess Plateau area[J].Journal of Soil and Water Conservation,2024,38(5):192-202.

黄土塬区不同土地利用方式对土壤理化性质的影响

张梦月¹,张钊玮¹,杨毅轩¹,张莉敏¹,栗如祥¹,韩晓阳²,林文¹

(1.山西农业大学农学院,山西 晋中 030801;2.西北农林科技大学水土保持科学与工程学院,陕西 杨凌 712100)

摘要: [目的] 为探讨不同土地利用方式对黄土塬区土壤理化性质的影响。[方法] 以裸地为对照(CK),设置常规施肥农田(H)、不施肥农田(L)、苜蓿草地(A)4个不同的利用方式于2005年开始在陕西长武开展长期定位试验,并于2021年7月对4个样地0—200 cm土壤的理化性质进行分析测定。[结果] 经过17年长期定位试验后,农田和草地对土壤理化性质的影响差异明显。(1)在土壤表层0—40 cm,苜蓿草地黏粒和粉粒颗粒体积分数较其他3个样地略有提高,沙粒体积分数略有降低趋势,而裸地处理黏粒和细粉粒比例有降低趋势。(2)与裸地相比,苜蓿草地0—20 cm土层土壤pH显著增加0.8%,施肥农田显著降低1.7%;除80—100 cm土层外,施肥农田土壤pH在0—200 cm剖面内整体显著低于其他3个处理。与裸地相比,在0—20 cm土层,苜蓿草地和施肥农田的有机碳储量、有机质和氮素显著增加,且苜蓿草地高于施肥农田;苜蓿草地与不施肥农田的有效磷和速效钾显著降低,施肥农田的速效钾也显著降低;不施肥农田碱解氮和硝铵态氮显著降低。(3)在不同土地利用方式下,土壤有机质、有机碳及全氮随着土层深度的加深表现出先降低,至60 cm后升高,到100 cm再次降低的趋势;草地的土壤有效磷在60 cm土层以下逐渐增加;其余养分指标在0—200 cm空间垂直分布整体呈下降趋势。(4)0—100 cm土壤有机质、全氮、碱解氮、硝铵态氮呈显著正相关,有效磷与有机质、全氮、碱解氮、pH呈显著负相关;100—200 cm有机质与速效钾呈显著正相关,有效磷与pH呈显著负相关。[结论] 黄土塬区合理的农田管理和连续种植苜蓿均可使有机质、全氮和速效氮等养分指标维持在较高水平,在一定程度上保障土壤质量。为促进该区域土壤的可持续性,建议农田中适当增加钾肥和有机肥的投入,而草地则需要补充适量的磷钾肥。

关键词: 长期定位; 土地利用方式; 土壤理化性质; 黄土塬区

中图分类号:S151.9

文献标识码:A

文章编号:1009-2242-(2024)05-0192-11

Effects of Different Land Use Patterns on Soil Physicochemical Properties in the Loess Plateau Area

ZHANG Mengyue¹, ZHANG Zhaowei¹, YANG Yixuan¹, ZHANG Limin¹,

LI Ruxiang¹, HAN Xiaoyang², LIN Wen¹

(1.College of Agriculture, Shanxi Agricultural University, Jinzhong, Shanxi 030801, China; 2. College of Soil and Water Conservation Science and Engineering, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: [Objective] In order to explore the effects of different land use patterns on soil physicochemical properties in the Loess Plateau area. [Methods] This study used bare land as a control (CK), and set four different use patterns as conventional fertilization farmland (H), unfertilization farmland (L), and alfalfa grassland (A) in Changwu, Shaanxi Province since 2005. The physical and chemical properties of 0—200 cm soil in the four plots were determined in July 2021. [Results] After 17 years, there were significant differences between farmland and grassland on soil physicochemical properties. (1) In 0—40 cm soil surface, the volume fraction of clay and powder in alfalfa field slightly increased compared with the other three plots, the volume fraction of sand slightly decreased, while the proportion of clay and fine powder in bare field

收稿日期:2024-03-24

修回日期:2024-05-06

录用日期:2024-06-03

网络首发日期(www.cnki.net):2024-07-17

资助项目:山西省小麦产业体系项目(2023CYJSTX02-16);国家自然科学基金项目(42007011);山西农业大学农学院研究生质量提升工程项目(2023YCX20)

第一作者:张梦月(2000—),女,在读硕士研究生,主要从事旱作栽培与作物生理研究。E-mail:zhangmengyue@163.com

通信作者:林文(1987—),男,副教授,硕士生导师,主要从事农田水文生态和旱作农田水氮利用研究。E-mail:slwrdeyue@163.com

http://stbxb.alljournal.com.cn

decreased. (2) In the 0—20 cm of the soil, compared to bare land, soil pH significantly increased by 0.8% in alfalfa grassland, and significantly decreased by 1.7% in fertilized farmland. Except for 80—100 cm, soil pH in 0—200 cm section of fertilized farmland was significantly lower than that in the other three plots. Compared with bare land, in the 0—20 cm of the soil, the organic carbon storage, organic matter and nitrogen content of alfalfa grassland and fertilized farmland increased significantly and the contents of them from alfalfa grassland was higher than those of fertilized farmland. The content of available phosphorus and available potassium of alfalfa grassland and unfertilized farmland decreased significantly. The content of available potassium of fertilized farmland also decreased significantly. The content of alkaline dissolved nitrogen and nitrate—ammonium nitrogen of unfertilized farmland decreased significantly. (3) Under different land use patterns, soil organic matter, organic carbon and total nitrogen showed a decreasing trend from 0 to 60 cm, then an increasing trend showed until it reached 100 cm depth and after where a decreasing trend showed again with the deepening of the soil layer. The available phosphorus content of the soil in grassland gradually increased after 60 cm. The vertical distribution of other nutrient indexes in 0—200 cm space showed a downward trend. (4) There was a significant positive correlation between soil organic matter, total nitrogen, alkaline dissolved nitrogen and nitrate—ammonium nitrogen at 0—100 cm, and a significant negative correlation between available phosphorus and organic matter, total nitrogen, alkaline dissolved nitrogen and pH. There was a significant positive correlation between soil organic matter and available potassium at 100—200 cm, and a significant negative correlation between available phosphorus and pH. [Conclusion] Reasonable farmland management and continuous planting of alfalfa in the Loess Plateau area can keep the nutrient indexes of organic matter, total nitrogen and available nitrogen at a high level, which can guarantee soil quality to a certain extent. In order to promote the sustainability of soil in this region, it is recommended to increase the input of potassium fertilizer and organic fertilizer in farmland, while the grassland needs to supplement the appropriate amount of phosphate and potassium fertilizer.

Keywords: long-term positioning; land use patterns; soil physical and chemical properties; the Loess Plateau area

Received: 2024-03-24

Revised: 2024-05-06

Accepted: 2024-06-03

Online(www.cnki.net): 2024-07-17

土壤是生态系统中诸多生态过程(如营养物质循环、水分平衡和凋落物分解等)的载体,其质量的好坏对于农业可持续性 & 生态系统的稳定性具有重要意义^[1]。影响土壤质量的因素较多,其中,土地利用方式是影响土壤质量的重要因素之一。土地的合理利用可以通过影响土壤团聚体粒径的分布和稳定性改善土壤的结构,调节土壤肥力状况以适合植物的生长发育^[2];不合理的土地利用导致土壤质量下降等问题,进而造成土壤退化。例如,杨满元等^[3]在衡阳紫色土丘陵坡地的研究发现,与耕地+撂荒地相比较,灌草地可以提高土壤含水量、土壤有机碳、全氮、碱解氮、微生物量碳和微生物量氮等,改善土壤性质;马志敏等^[4]研究发现,在黑河中游荒漠绿洲区长期的耕作活动,以及耕地的扩张会导致地力的退化。土壤理化性质是综合反映土壤质量的重要指标,土壤养分的高低直接制约着土壤的生产能力^[5]。深入了解土壤质量及其理化性质与土地利用方式之间的关系变化,有

助于合理利用土地资源,评估更有利于农业生态可持续发展的因地制宜的方式。

黄土高原地区由于地形起伏比较大、降雨集中和植被覆盖率低等问题,导致该地区水土流失严重,以干旱、风沙为主的自然灾害频繁,生态环境十分脆弱,该区的农业生态可持续发展受到严重的威胁^[6]。自1999年退耕还林还草工程实施之后,黄土塬区林草植被覆盖率从1999年的31.6%提高到2020年的67.0%^[7],有效遏制该地区的水土流失。有研究^[8]表明,林地和草地由于植被种类丰富、根系多,大量的根系及其凋落物腐解为土壤提供充足的养分,尤其是微生物量的增加和活性的增强,加速土壤物质代谢和养分的积累,增强土壤团聚体稳定性,增加土壤有机碳储量^[9],最终改善土壤理化性质和提高土壤肥力^[10]。虽然退耕还林还草工程区域生态环境得到有效改善,但是黄土塬区依旧是中国重要的农业生产区。在农业生产中,不同的管理及栽培耕作措施等可以改善土壤的理

化性质^[11],进而提高作物生产。施肥是提高作物生产力的一个重要措施,在保障国家粮食安全中发挥着重要作用,但施肥在为土壤带来养分的同时,也带来潜在的资源和环境等问题。例如,施用氮肥增加土壤有机碳氮组分^[12],但是降低土壤的 pH^[13],在长期单施化肥的情况下,土壤质量降低^[14]。

针对黄土塬区不同土地利用方式及其植被类型等对土壤环境的效应,虽有不少的研究,但是关于不同方式下对黄土塬区土壤生态的长期效应还不明确。因此,本研究在典型的黄土塬区陕西省长武县开展长期定位试验,通过对该区内裸地、苜蓿草地、长期施肥农田、不施肥农田 4 种方式下 0—200 cm 土壤样品理化性质的分析,量化不同土地利用方式下土壤理化性质相关指标的分布特征,为区域土壤养分及其质量的提高、土地资源合理的利用及该地区的农业生态可持续发展提供科学参考和数据支持。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于中国科学院长武农业生态试验站(35°14'N,107°41'E),属黄土塬区,海拔 1 247 m,属于典型的暖温带半大陆性季风气候区,光照充足,昼夜温差大,光热资源丰富,年平均气温 9.1℃,总辐射 483.7 kJ/cm²,全年积温 3 029℃,多年平均无霜期 171 天,多年平均降水量 584 mm,降水分布不均匀,主要集中在 7—9 月。塬区土层深厚,主要土壤类型为黑垆土。

1.2 试验设计

该试验于 2005 年开始,在土壤肥力均匀的农田上划分出 4 个相邻样地,设置 4 个处理,以常年裸地(CK)为对照,设置多年生苜蓿草地(A)、常规施肥农田(H)、不施肥农田(L)4 种利用方式;试验样地面积 100 m²(10 m×10 m),每个样地相邻之间用水泥池阻隔,以阻断土壤水分和养分的交换。4 块样地均为平地,气候条件一致。农田主要种植方式为小麦连作或小麦-玉米-小麦轮作,本试验采样年度农田种植方式为小麦连作。各样地管理措施见表 1。

表 1 不同土地利用方式管理措施

Table 1 Different land use patterns management measures

土地利用方式	土壤体积质量	管理措施
CK	1.29	定期清理杂草,无植物生长
H	1.24	氮肥(N,尿素)、磷肥(P ₂ O ₅ ,过磷酸钙)分别基施 120,60 kg/hm ² ,无钾肥投入
L	1.25	不施肥,其他管理措施同施肥农田
A	1.34	不施肥,每年刈割 3 次

1.3 测定项目与方法

于 2021 年 7 月农田夏季休闲期使用土钻采集 0—200 cm 土层深度的土壤,20 cm 为 1 个土层,共 10 个土层,同一个样地样品采集设置 3 个重复。将采取到的土壤样品装入密封袋并分类标记,带回实验室自然风干,并去除植物根系,过 1,0.15 mm 筛,再测试土壤养分含量、土壤 pH 和土壤粒径。

土壤养分测定指标为有机质、全氮、硝铵态氮、碱解氮、有效磷和速效钾。重铬酸钾容量法测定土壤有机质,凯氏定氮法测定土壤全氮,浸提—振荡—过滤—流动分析仪测定硝铵态氮,采用碱解扩散法测定碱解氮,钼锑抗比色法测定土壤有效磷,碳酸氢铵浸提—火焰光度法测定土壤速效钾^[15],采用电位法测定土壤 pH(水土比 1:5)。土壤颗粒比表面积和土壤粒径按照 0—20, 20—40,40—60,60—100,100—200 cm 采用马尔文激光粒度仪(Mastersizer 3000)测定。

以 1.724 为系数对有机质进行换算得到土壤有机碳,计算公式为:

SOC=SOM/1.724

式中:SOC 为土壤有机碳(g/kg);SOM 为土壤有机质(g/kg)。土壤有机碳储量采用公式 SOCS=SOC×BD×H×10⁻²。式中:SOCS 为有机碳储量(kg/m²);BD 为土壤体积质量(g/cm³);H 为土层深度(cm)。

1.4 数据处理

本研究相关数据采用 Microsoft Excel 2019 与 IBM SPSS Statistics 25 进行统计分析,采用单因素 ANOVA 方差分析和 Duncan 法进行多重比较及其显著性检验(α=0.05),采用 Pearson 法对土壤理化性质指标间进行相关分析。使用 OriginPro 2023 软件制图。

2 结果与分析

2.1 不同土地利用方式下土壤颗粒组成变化

土壤颗粒组成指土壤中大小不同的各级土粒的比率,是影响土壤松紧度、通透性能和肥力高低的基本因素,是反映土壤发育程度的标志之一。土壤颗粒组成主要受母质的影响,而不同植物根系的物理作用也会使土壤颗粒大小及其孔隙状况产生一定的差异。从表 2 可以看出,在 0—200 cm 剖面上,土壤颗粒主要以细粉粒(25.29%~35.42%)和粗粉粒(29.41%~33.95%)为主,中砂粒和粗砂粒的体积分数极小,说明该地区土壤质地为粉壤土。在土壤表层 0—40 cm,A 处理黏粒和粉粒颗粒体积分数较其他 3 个样地略有提高,而沙粒体积分数略有降低趋势;CK 处理黏粒和细粉粒所占比例较低,沙粒所占比例较高。在整个 0—200 cm 剖面内,H、A 黏粒和细粉粒体积分数表现出随土层深度的加深先逐渐增加,到 60 cm 后其

体积分数逐渐减小;H、L粗粉粒体积分数在60 cm下降,到100 cm之后又表现出上升的趋势;中砂体积分数在4个地块间都随着土层深度的加深而逐渐下降,到60—100 cm土层略有升高。

表2 黄土塬区不同土地利用方式下0—200 cm土壤颗粒组成

Table 2 Soil particle composition of 0—200 cm under different land use patterns in the Loess Plateau area

处理	土层深度/cm	黏粒/%	细粉粒/%	粗粉粒/%	极细砂/%	细砂/%	中砂/%	粗砂/%
CK	0—20	14.26	27.03	30.02	13.70	10.02	4.56	0.41
	20—40	14.65	26.59	31.70	15.25	9.15	2.52	0.15
	40—60	14.48	26.40	32.12	15.67	10.00	1.33	0
	60—100	16.45	27.99	31.32	13.96	8.76	1.51	0.02
	100—200	14.39	25.29	30.29	15.50	11.71	2.73	0.08
	平均	14.85	26.66	31.09	14.82	9.93	2.53	0.13
H	0—20	15.35	27.71	30.06	12.45	9.07	4.95	0.40
	20—40	17.01	29.52	31.57	13.07	7.44	1.39	0
	40—60	18.11	31.89	33.69	11.93	3.54	0.80	0.04
	60—100	15.94	28.02	31.56	13.58	8.14	2.60	0.16
	100—200	13.74	26.49	33.43	15.67	8.66	1.93	0.07
	平均	16.03	28.73	32.06	13.34	7.37	2.34	0.14
L	0—20	15.43	28.41	33.25	14.21	7.39	1.31	0
	20—40	18.99	32.28	31.11	11.72	5.01	0.89	0.01
	40—60	18.41	30.62	32.84	12.08	5.25	0.80	0
	60—100	18.25	29.63	31.13	12.75	7.15	1.08	0
	100—200	16.66	29.08	32.26	13.56	7.23	1.19	0.01
	平均	17.55	30.00	32.12	12.86	6.41	1.05	0
A	0—20	18.13	32.36	30.62	10.47	5.24	2.88	0.29
	20—40	20.57	34.79	29.41	9.64	4.36	1.22	0.01
	40—60	21.02	35.42	30.31	9.86	3.08	0.31	0
	60—100	16.41	29.34	32.47	13.09	6.30	2.25	0.13
	100—200	15.81	29.97	33.95	13.03	5.21	1.91	0.12
	平均	18.39	32.38	31.35	11.22	4.84	1.71	0.11

注:根据美国土壤质地分类系统^[16],将土壤粒径分为7个级别,分别为黏粒(<0.002 mm)、细粉粒(0.002~0.02 mm)、粗粉粒(0.02~0.05 mm)、极细砂(0.05~0.10 mm)、细砂(0.10~0.25 mm)、中砂(0.25~0.5 mm)和粗砂(0.5~2 mm)。

2.2 不同土地利用方式土壤化学性质及分布特征

2.2.1 土壤有机质及有机碳储量 由图1可知,CK、H、L、A 4个样地0—200 cm土壤有机质分别为5.99~11.50,5.16~13.76,6.28~11.89,5.49~18.64 g/kg,土壤有机碳储量分别为13.63,13.20,13.09,14.91 kg/m²。0—20 cm A、H、L、CK土壤有机质分别为18.64,13.76,11.89,11.50 g/kg,土壤有机碳储量分别为2.90,1.98,1.72,1.72 kg/m²,与CK相比,A、H有机质显著增加62.1%,19.7%,A、H有机碳储量显著增加68.6%,15.1%,无论有机质还是有机碳储量,CK与L之间无显著差异。在0—60 cm剖面,土壤有机质及其有机碳储量降低幅度较大,苜蓿草地最为明显;在60 cm土层深度之后均表现出略有升高而后逐渐下降。

2.2.2 土壤pH 黄土塬区不同土地利用方式下土壤0—200 cm pH变化见图2b和图3b。CK、H、L、A土壤pH分别为8.53~8.69,8.39~8.61,8.57~8.71,8.61~8.70。与CK相比,A土壤0—20 cm土

层pH显著增加0.8%,H显著降低1.7%,CK与L之间差异不显著;CK与L土壤pH随着土层的加深表现出先升高后降低而又升高的趋势,且在100 cm处pH达到最低;除80—100 cm外,H地块土壤pH在0—200 cm剖面内整体显著低于其他3个地块。

从该结果看,施用化肥使得土壤酸化而造成土壤pH有一定的降低,而种植苜蓿对提升土壤pH有一定的功效。

2.2.3 土壤全氮 土壤全氮是评价土壤质量水平的一个重要指标。CK、H、L、A土壤全氮分别为0.29~0.64,0.29~0.76,0.31~0.67,0.30~1.11 g/kg。在0—20 cm,CK、H、L、A全氮分别为0.64,0.76,0.67,1.11 g/kg(图2a),与CK相比,A、H、L分别增加73.4%,18.8%,4.7%,但L增加效果不明显;20—40 cm A地块的全氮分别显著增加22.1%(CK),8.8%(H),8.8%(L),40—60 cm分别显著增加15.6%(CK),11.5%(H),5.8%(L)。0—200 cm剖面内,土壤全氮表现出先降低后升高其次再逐渐降低的趋势(图3a),与有机质变化相似。

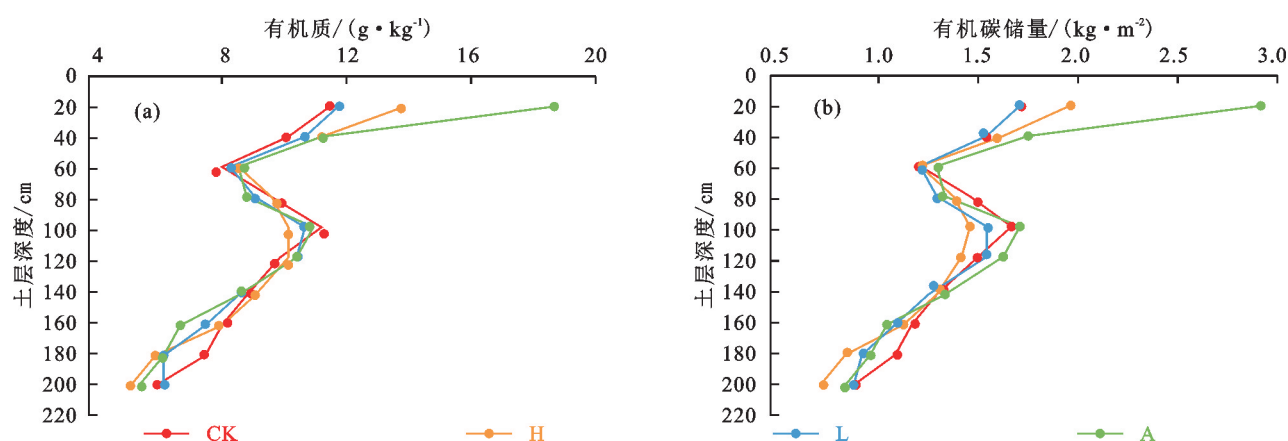


图 1 黄土塬区不同土地利用方式下土壤有机质及其有机碳储量变化

Fig.1 Changes of soil organic matter content and organic carbon storage under different land use patterns in the Loess Plateau area

2.2.4 土壤速效养分 CK、H、L、A 土壤碱解氮分别为 6.77~20.53, 4.96~25.05, 6.99~18.61, 5.87~36.10 mg/kg 。在 0—20 cm, CK、H、L、A 碱解氮分别为 20.53, 25.05, 18.61, 36.10 mg/kg (图 2d), 与 CK 相比, A、H 分别显著增加 75.8%, 22.0%, L 显著降低 9.4%; 在 20—40 cm CK、H、L、A 碱解氮分别为 15.23, 18.73, 18.28, 19.86 mg/kg , 与 CK 相比, A、H、L 分别显著增加 30.4%, 23.0%, 20.0%; 40—60 cm 4 个地块碱解氮没有显著差异。在整个 0—200 cm 剖面内, CK、L、A 空间分布同样与有机质相似(图 3d)。

CK、H、L、A 土壤有效磷分别为 2.18~13.06, 3.01~13.51, 2.06~7.57, 0.94~3.71 mg/kg 。在 0—20 cm, CK、H、L、A 有效磷分别为 13.06, 13.51, 7.57, 3.71 mg/kg (图 2e), 与 CK 相比, H 增加 3.5% 但增加效果不明显, L、A 分别显著降低 42.0%, 71.6%; 在 20—40 cm, CK、H、L、A 土壤有效磷分别为 9.88, 10.98, 4.13, 1.93 mg/kg , 与 CK 相比, L、A 分别显著降低 58.2%, 80.5%, CK 与 H 差异不显著。40—60 cm 土层, A 有效磷较 CK 显著降低 73.8%。0—60 cm 随着土层深度的增加有效磷急剧下降, 尤以 H 和 CK 最为明显; 在 60 cm 之后 A 有效磷逐渐增加(图 3e)。

CK、H、L、A 土壤速效钾分别为 70.00~119.33, 58.67~100.67, 66.00~101.33, 57.67~108.33 mg/kg 。0—20 cm, 与 CK 相比, A、H、L 分别显著降低 9.2%, 15.6%, 17.0%, H 与 L 无显著差异(图 2f); 在 20—40 cm, CK、H、L、A 速效钾分别为 102.67, 97.17, 101.33, 98.33 mg/kg , 四者差异不显著; 在 40—60 cm, CK、H、L、A 速效钾分别为 99.33, 92.67, 99.33, 89.67 mg/kg , 与 CK 相比, H、A 速效钾显著降低 6.7%, 9.7%。40—180 cm, CK、L 速效钾变化趋势相同, 60—80 cm 略有增加, 而后逐渐下降; H 速效钾在

60 cm 之后逐渐下降(图 3f)。

2.2.5 土壤硝铵态氮 不同土地利用方式下土壤 0—200 cm 土层硝铵态氮变化见图 2c 和图 3c。CK、H、L、A 土壤硝铵态氮分别为 2.16~7.96, 2.06~9.56, 2.69~5.01, 2.68~17.19 mg/kg 。与 CK 相比, 0—20 cm 土层 A、H 显著增加 116.0%, 20.1%, L 显著降低 37.1%; 20—40 cm 土层 CK、H、L、A 硝铵态氮分别为 4.11, 5.88, 4.19, 10.64 mg/kg , 与 CK 相比, A、H 显著增加 158.9%, 43.1%, CK 与 L 之间没有显著差异, 结合土壤有机质及其全氮和碱解氮变化, 表明牧草种植和施肥均能提高土壤氮。在 0—40 cm 土层, CK、A、H 地块硝铵态氮急剧下降, A 与 H 可延伸至 60 cm; 在 60 cm 及其以下, 变化幅度较小, 且 4 种方式的质量分数在对应土层内相近。

2.3 土壤养分之间的关系

2.3.1 土壤养分之间的相关性 从图 4a 可以看出, 0—100 cm 土层土壤 SOM、TN、AN、TIN 呈极显著正相关; AP 与 SOM、TN、AN、pH 呈显著负相关, 与 AK、TIN 间关系不显著; AK 与其余 6 个指标间关系均不显著。土壤 pH 与 SOM、TN、AN、TIN 之间呈不显著正相关。

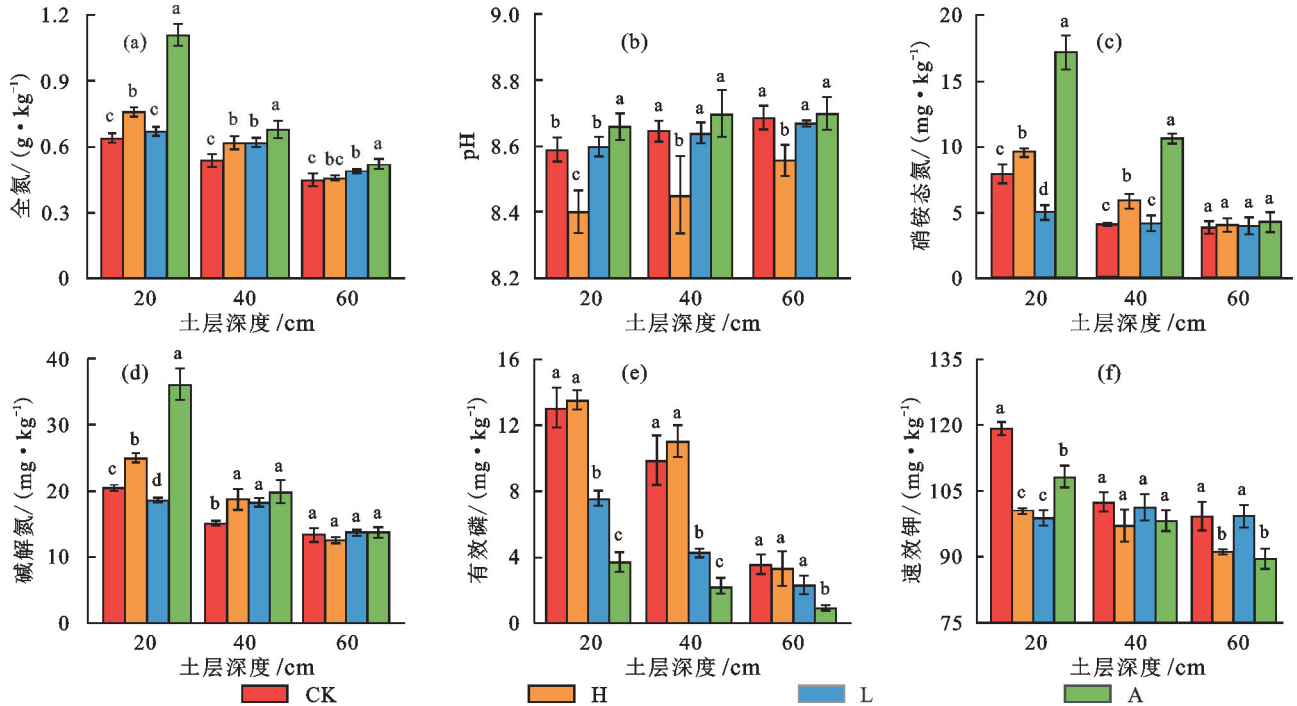
由图 4b 可知, 100—200 cm 土层大部分养分指标之间呈正相关, 且 AK 与 SOM 呈极显著正相关; pH、TIN 与 AN、AP 呈负相关且 AP 与 pH 之间的相关性显著; 除此之外, AP 与 TN 表现出负相关。

2.3.2 不同土地利用方式下养分的主成分分析

从图 5 可以看出, 0—100 cm 2 个主成分累计方差贡献达到 90.5%, 达到分析要求; 主成分 1 代表 SOM、TN、AN、TIN, 这些参数构成数据集中所呈现的大部分变异, 其参数的相关系数绝对值都达到 0.4 以上, 具有较大的载荷。主成分 2 代表 pH、AK, 且

相关系数绝对值达到 0.6, 其贡献率为 21.5%, 该结果表明在 0—100 cm 土层土壤有机质和氮素组分受到地上部分植被变化的影响较大, 而 pH 和速效钾收到

的变化影响较小; 100—200 cm 土层 2 个主成分累计方差贡献率达到 67.9%, 分析效果良好; 主成分 1 主要参数为 TN、pH 和 TIN。



注: 图柱上方不同字母表示不同处理间差异显著($p < 0.05$)。

图2 黄土塬区不同土地利用方式下 0—60 cm 土层土壤化学性质

Fig.2 The content of soil chemical properties in 0—60 cm under different land use patterns in the Loess Plateau area

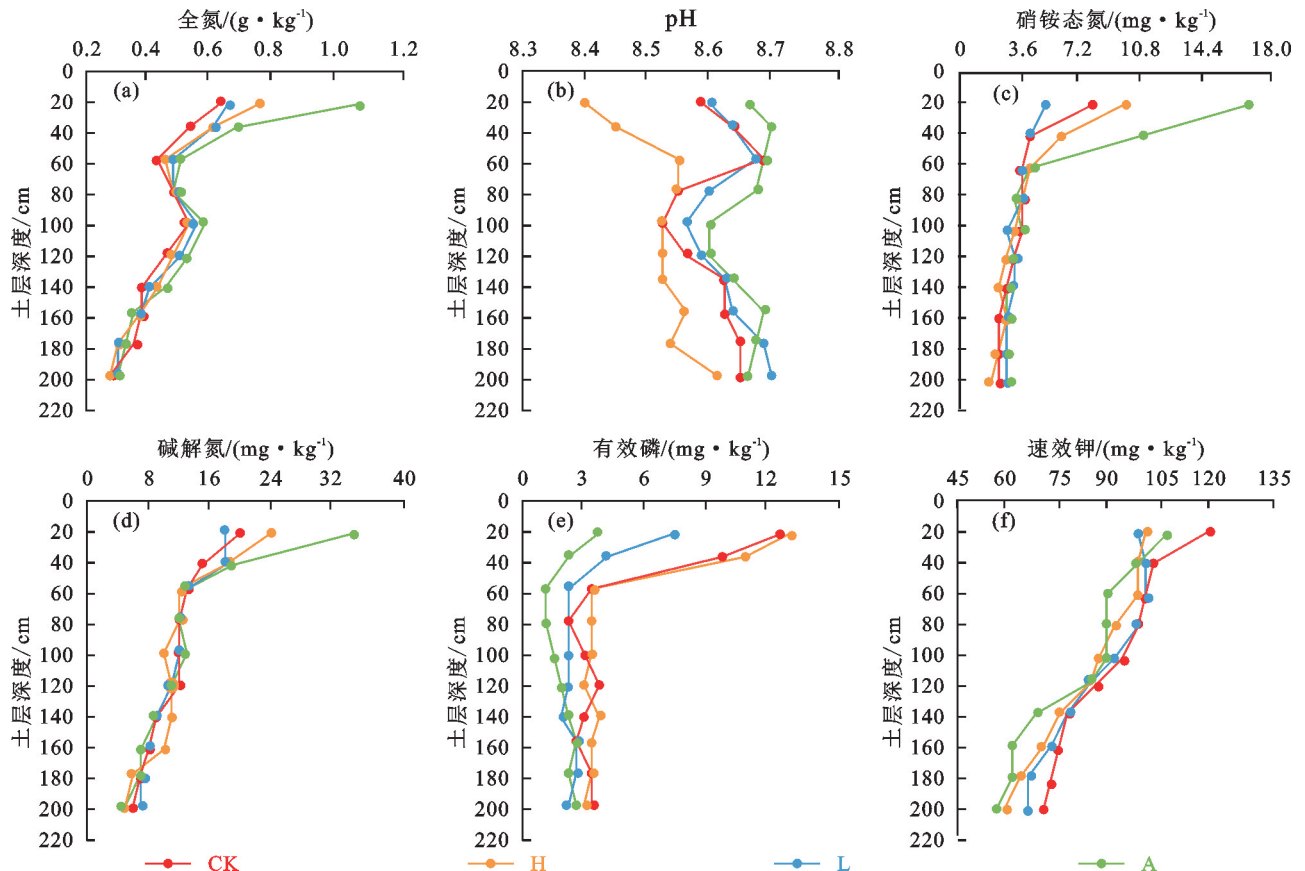


图3 黄土塬区不同土地利用方式下 0—200 cm 土层土壤化学性质剖面变化

Fig.3 The profile changes of soil chemical properties in 0—200 cm under different land use patterns in the Loess Plateau area

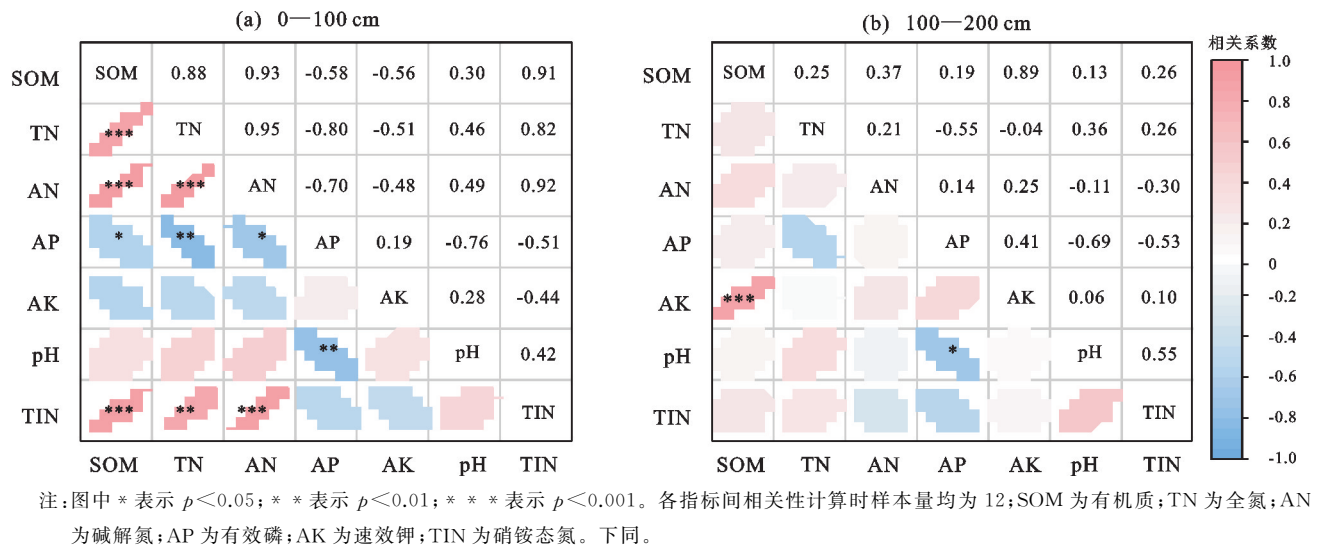


图 4 黄土塬区不同土地利用方式下土壤化学指标的相关关系

Fig.4 The correlation of soil chemical indexes under different land use patterns in the Loess Plateau area

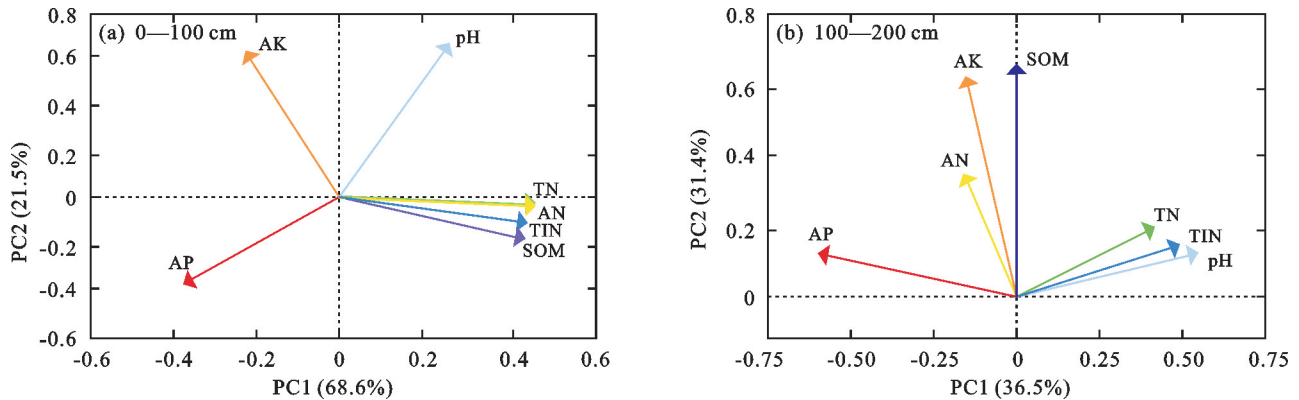


图 5 黄土塬区 0—100, 100—200 cm 土层土壤化学性质指标的主成分分析

Fig.5 Principal component analysis of soil chemical properties at 0—100 cm and 100—200 cm in the Loess Plateau area

3 讨论

3.1 土地利用对土壤颗粒组成的影响

土壤质地受母质、时间、气候、植被和地形等成土因素的共同影响。对于本研究而言,各样方于 2005 年在背景值相同的土地上建立,除植被因素外,其他 4 个因素均完全一致。分析结果表明,不同土地利用方式之间土壤质地不具有显著性差异。通过数据分析发现,苜蓿草地黏粒和粉粒颗粒体积分数较其他 3 个样地略有提高,而沙粒体积分数略有降低趋势;裸地的黏粒和细粉粒所占比例较低,沙粒比例较大。程立平等^[17]在该样地上的前期研究结果表明,黄土塬区降水可对潜水进行补给,且主要以大孔隙优先流的形式发生,休闲地的补给量高于其他处理。大孔隙优先流在补给潜水的过程中,粒径较小的粉粒和黏粒则可能随着水流向下迁移^[18],因而导致本研究中裸地粉粒和黏粒的比例呈降低趋势。而对于苜蓿草地而言,大量的水分被根系截获,对于潜水的补给很少,因

而粉粒和黏粒所占比例较高。

3.2 土地利用对土壤固碳的影响

土壤有机质在土壤中所占比例小,但是对土壤质量贡献大^[19]。农田土壤作为陆地最大的有机碳库,对全球碳平衡的维持具有至关重要的意义。本研究中,土壤表层 0—20 cm 施肥农田有机质和有机碳储量显著高于不施肥农田和裸地。一方面,外源化肥的输入向土壤中提供充足的养分,促进作物地上部和地下的生长发育,根系等残体在土壤中腐解有助于提高土壤有机质^[20];另一方面,有研究^[21]发现,施用氮肥使得土壤中苯酚氧化酶的活性降低,从而增加土壤碳积累量。

苜蓿草地的有机质和有机碳储量显著高于农田。一方面,在草地覆盖下,土壤凋落物含量高,相对于小麦和玉米来说,豆科牧草苜蓿可与固氮菌结合进行固氮作用,且苜蓿根系发达,老根不断死亡分解形成有机物,从而使得苜蓿草地有机质与有机碳储量高;另一方面,农田由于耕作等农业生产活动频繁,加快土

壤有机质的矿化作用。无论是苜蓿草地还是农田,在0—60 cm 有机质随着土层深度的增加而降低,60—100 cm 随着土层深度的增加而升高,而后在100 cm 土层之后,有机质逐渐下降且远低于表层,有机质的“S”形趋势与彭令发等^[22]的研究结果相似,这种垂直空间分布规律与土壤结构和有机物的输入与输出有关^[23]。0—60 cm 土层,植物、动物微生物残体和根系分泌物逐渐减少,有机质逐渐降低,而在60—80 cm 土层中,虽然有根系的补充,但因其远离地表,有机质矿化少,因此有所提高,在100 cm 之后虽然有机质矿化较少,但其根系也相应减少^[24],有机质输入减少。相关分析(图4)也表明,黄土塬区土壤有机质与土壤全氮、碱解氮和无机氮等指标呈正相关关系。蔡雪梅等^[25]在对苜蓿和农田土壤固碳效应研究时发现,土壤全氮是影响固碳基因 *cbbL* 丰度的关键因子之一。因此,本研究中驱动苜蓿草地及施肥农田的固碳的原因在于氮素输入的增加促进有机物料输入,同时氮素输入进一步促进微生物固碳相关基因的表达,从而有效增加土壤碳的固存。

3.3 土地利用对其他化学性质的影响

长期施肥导致的土壤酸化现象不容忽视^[26]。尽管黄土塬区土壤呈弱碱性,但数据显示施肥农田的pH 低于其他处理,这一现象可能对土壤微生物活性和养分有效性产生负面影响。苜蓿草地土壤 pH 较施肥农田有明显提高,并且在20 cm 处 pH 达到最大值,可能由于苜蓿的固氮作用将氮素转化为氨,进而形成铵根离子,从而增大其 pH^[27];另一方面,有研究^[28]认为,在连续多年种植苜蓿后,苜蓿草地的 CO_3^{2-} 、 HCO_3^- 、 Mg^{2+} 、 Na^+ 等离子比农田高,使得土壤 pH 高于农田,这可能是本研究中苜蓿地土壤 pH 升高的另一个原因。

氮是土壤中最活跃的大量营养元素之一,从研究结果来看,由于施肥的影响,氮肥提高与N 矿化相关的NAG(糖苷酶)的活性^[29],土壤氮在施肥农田中较高。对于裸地和不施肥农田来说,裸地全年无植被保护,导致氮素矿化后被淋溶,而不施肥农田由于作物不断耗水,向深层渗漏的水分减少^[17],进而导致速效氮素随水分向深层淋溶减少,同时存留在根系中的氮素随根系腐解后再次回到土壤中,二者综合效益导致其表层土壤全氮高于裸地。苜蓿作为豆科作物,其根系本身的结瘤固氮作用使土壤中氮素显著高于农田,在一定程度上可以提高土壤肥力。

有效磷在空间上的分布表现为0—60 cm 土层下

降,在60 cm 之后,苜蓿草地有效磷逐渐升高,这可能是由于大部分根系分布在60 cm 以上耕层中^[30],农田由于施用磷肥的原因,其质量分数显著高于苜蓿草地;另外,紫花苜蓿生长期需大量磷素导致土壤中磷素向根际转运^[31],所以苜蓿草地中有效磷较低。本研究发现,在表层0—20 cm 施肥农田和不施肥农田速效钾之间没有显著差异,但明显低于裸地,这是因为本研究中无论是施肥农田还是不施肥农田,均无钾肥的输入,且农作物的生长不断消耗土壤中的速效钾,因此其速效钾低于裸地。对于苜蓿地而言,土壤表层微生物丰度与群落多样性较高^[32],微生物代谢能力较强,微生物在分解凋落物的同时,形成一系列酚酸类络合、螯合物并释放大量 CO_2 形成碳酸,这些酸类物质又可经过不断分解风化,促进土壤中无效态钾向有效性方向转化,从而增加表层速效钾^[33]。在40 cm 之后,苜蓿根系对有效养分的吸收同化作用较小麦或玉米强,从而其速效钾低于农田。

综上,合理的施肥在提高黄土塬区土壤质量和保障农业可持续方面具有重要作用。针对当前农田施肥现状,适当增加钾肥的施用有助于维持农田的养分平衡;而有机肥与无机肥的配合施用则是平衡土壤酸化问题的重要选择^[34]。但是对于小麦种植或玉米种植当季对该区土壤理化性质的影响有待进一步的研究。此外,关于地上部分生物量和植物对养分的吸收利用与地下部分的关系等,由于本研究未测定,这为进一步分析确定黄土塬区合理的土地利用带来一定的局限性。

4 结论

(1)草地管理相较于传统农田耕作,具有提升土壤表层的小颗粒物质相对含量的趋势,对于增强土壤的保水能力和结构稳定性具有一定的意义。然而,相关问题还需在延长试验年限情况下进行动态监测。

(2)草地土壤在有机质和有机碳储量方面显著优于农田土壤,主要得益于草地植被较高的生物量和生物固氮作用。然而,草地土壤中有效磷和速效钾相对较低,表明未来需考虑适量补充这些养分以维持土壤肥力。

(3)长期施肥农田在土壤全氮上有所提升,但土壤 pH 的显著降低可能对土壤健康和作物生长产生不利影响。因此,建议调整施肥策略,减少化学肥料的使用,增加有机肥料的投入,以平衡土壤养分并减

少土壤酸化的风险。

(4)土壤养分的垂直分布特征表明,土壤有机质、有机碳和全氮随土层深度的增加呈特定的变化模式。特别在 60 cm 土层深度之后,草地土壤中有效磷的增加可能与根系分布和微生物活性有关,这一发现为土壤管理和养分循环提供重要的实践指导。

综上所述,为了黄土塬区的土壤健康和农业可持续性,建议采取综合管理措施,包括合理轮作、有机无机肥料配合使用,以及关注土壤深层养分管理和土壤生物多样性的保护。通过这些措施,可以优化土地利用方式,提升土壤质量,促进该地区农业生态系统的长期稳定发展。

参考文献:

- [1] 谭玉兰,杨丰,陈超,等.喀斯特山区土地利用方式对土壤质量的影响[J].西南农业学报,2019,32(5):1133-1138.
TAN Y L, YANG F, CHEN C, et al. Effects of different land use types on soil quality in karst mountainous area [J]. Southwest China Journal of Agricultural Sciences, 2019, 32(5): 1133-1138.
- [2] MCLAUCHLAN K. The nature and longevity of agricultural impacts on soil carbon and nutrients: A review [J]. Ecosystems, 2006, 9(8): 1364-1382.
- [3] 杨满元,魏甲彬,李娟,等.衡阳紫色土丘陵坡地土地利用变化对土壤性质的影响[J].湖南生态科学学报,2023,10(1):75-85.
YANG M Y, WEI J B, LI J, et al. Effects of land use/cover change on soil properties on sloping-land with purple soils in Hengyang [J]. Journal of Hunan Ecological Science, 2023, 10(1): 75-85.
- [4] 马志敏,吕一河,孙飞翔,等.黑河中游荒漠绿洲区土地利用的土壤养分效应[J].生态学报,2013,33(19):6328-6334.
MA Z M, LÜ Y H, SUN F X, et al. Effects of land use on soil nutrient in oasis-desert ecotone in the middle reach of the Heihe River [J]. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(19): 6328-6334.
- [5] 李泽霞,董彦丽,马涛.黄土区梯化坡地不同土地利用方式对土壤理化性质的影响[J].水土保持通报,2020,40(3):43-49.
LI Z X, DONG Y L, MA T. Effects of land use types on soil physical and chemical properties in terraced sloping land of loess areas [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2020, 40(3): 43-49.
- [6] 张良侠,樊江文,张海燕,等.黄土高原地区生态脆弱性时空变化及其驱动因子分析[J].环境科学,2022,43(9):4902-4910.
- [7] 傅伯杰,刘彦随,曹智,等.黄土高原生态保护和高质量发展现状、问题与建议[J].中国科学院院刊,2023,38(8):1110-1117.
FU B J, LIU Y S, CAO Z, et al. Current conditions, issues, and suggestions for ecological protection and high-quality development in Loess Plateau [J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2023, 38(8): 1110-1117.
- [8] JOSHI R K, GARKOTI S C. Influence of vegetation types on soil physical and chemical properties, microbial biomass and stoichiometry in the central Himalaya [J]. Catena, 2023, 222: e106835.
- [9] 宣可凡,李晓鹏,张佳宝,等.有机物料改良土壤结构及其定量化研究方法综述[J].灌溉排水学报,2023,42(2):95-102.
XUAN K F, LI X P, ZHANG J B, et al. Improving soil structure by organic material amendments: A review [J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2023, 42(2): 95-102.
- [10] 李映雪,臧真凤,张瑜,等.退耕还草对土壤碳库活度及团聚体活性有机碳组分分布的影响[J].水土保持研究,2023,30(5):241-249.
LI Y X, ZANG Z F, ZHANG Y, et al. Changes in soil carbon pool activity and distribution of labile organic carbon composition in soil aggregates following conversion of farmland to grassland on the Loess Plateau [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2023, 30(5): 241-249.
- [11] 王秋菊,张敬涛,盖志佳,等.长期免耕秸秆覆盖对寒地草甸土土壤物理性质的影响[J].应用生态学报,2018,29(9):2943-2948.
WANG Q J, ZHANG J T, GAI Z J, et al. Effect of long-term straw mulching and no-tillage on physical properties of meadow soil in cold region [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2018, 29(9): 2943-2948.
- [12] YANG C D, ZHANG S H, TAN G Y, et al. Effects of cover crops and nitrogen fertilization on soil physical properties, carbon and nitrogen fractions, and winter wheat yield in the Chinese Loess Plateau: A 4-year field experiment [J]. Field Crops Research, 2024, 312: e109400.
- [13] LIU J S, ZHANG X, WANG H, et al. Long-term nitrogen fertilization impacts soil fungal and bacterial community structures in a dryland soil of Loess Plateau

- in China[J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2018, 18(4):1632-1640.
- [14] 王改兰,段建南,贾宁凤,等.长期施肥对黄土丘陵区土壤理化性质的影响[J]. *水土保持学报*, 2006, 20(4):82-85.
- WANG G L, DUAN J N, JIA N F, et al. Effects of long-term fertilization on soil physical and chemical property in loess hilly area[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2006, 20(4):82-85.
- [15] 鲍士旦.土壤农化分析[M].3版.北京:中国农业出版社, 2000:106-107.
- BAO S D. Soil and agricultural chemistry analysis[M]. 3rd Edition. Beijing: China Agriculture Press, 2000:106-107.
- [16] 吴克宁,赵瑞.土壤质地分类及其在我国应用探讨[J]. *土壤学报*, 2019, 56(1):227-241.
- WU K N, ZHAO R. Soil texture classification and its application in China[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2019, 56(1):227-241.
- [17] 程立平,刘文兆,李志,等.长武黄土塬区土地利用变化对潜水补给的影响[J]. *水科学进展*, 2016, 27(5):670-678.
- CHENG L P, LIU W Z, LI Z, et al. Land use change affects groundwater recharge in the Changwu Loess Tableland of China[J]. *Advances in Water Science*, 2016, 27(5):670-678.
- [18] NORGAARD T, PARADELO M, MOLDRUP P, et al. Particle leaching rates from a loamy soil are controlled by the mineral fines content and the degree of preferential flow[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2018, 47(6):1538-1545.
- [19] GÖCKE M I, GUIGUE J, BAUKE S L, et al. Interactive effects of agricultural management on soil organic carbon accrual: A synthesis of long-term field experiments in Germany[J]. *Geoderma*, 2023, 438:e116616.
- [20] 刘哲,张扬,雷娜,等.优化施肥方式对黄土高原新增耕地土壤有机质含量和团聚体特性的影响[J]. *水土保持通报*, 2021, 41(5):99-106.
- LIU Z, ZHANG Y, LEI N, et al. Effects of optimized fertilization treatments on soil aggregate characteristics and organic matter content of newly reclaimed cultivated land in Loess Plateau[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2021, 41(5):99-106.
- [21] CHEN J, LUO Y Q, VAN GROENIGEN K J, et al. A keystone microbial enzyme for nitrogen control of soil carbon storage [J]. *Science Advances*, 2018, 4(8):e1689.
- [22] 彭令发,郝明德,来璐,等.黄土旱塬区长期施肥对土壤剖面养分分布的影响[J]. *水土保持通报*, 2003, 23(1):36-38.
- PENG L F, HAO M D, LAI L, et al. Effect of long-term fertilization on nutrients distribution of soil profiles in arid highland of Loess Plateau[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2003, 23(1):36-38.
- [23] 彭佩钦,张文菊,童成立,等.洞庭湖典型湿地土壤碳、氮和微生物碳、氮及其垂直分布[J]. *水土保持学报*, 2005, 19(1):49-53.
- PENG P Q, ZHANG W J, TONG C L, et al. Vertical distribution of soil organic carbon, nitrogen and microbial biomass C, nat soil profiles in wetlands of Dongting Lake floodplain[J]. *Journal of Soil Water Conservation*, 2005, 19(1):49-53.
- [24] 高元亢,李婧,汪星,等.黄土丘陵苜蓿与柠条深层土壤干化状况及根系与养分特征[J]. *水土保持研究*, 2023, 30(6):168-176.
- GAO Y K, LI J, WANG X, et al. Soil desiccation and root and nutrient characteristics of medicago sativa L. and caragana korshinskii in loess hilly area[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2023, 30(6):168-176.
- [25] 蔡雪梅,潘占东,罗珠珠,等.黄土高原雨养区苜蓿种植年限对土壤固碳细菌丰度和活性有机碳组分的影响[J]. *草业科学*, 2021, 38(6):1024-1034.
- CAI X M, PAN Z D, LUO Z Z, et al. Effects of alfalfa planting with different cultivating ages on abundance of soil carbon sequestration bacteria and labile organic carbon fractions in rainfed Loess Plateau[J]. *Pratacultural Science*, 2021, 38(6):1024-1034.
- [26] GUO J H, LIU X J, ZHANG Y, et al. Significant acidification in major Chinese croplands[J]. *Science*, 2010, 327(5968):1008-1010.
- [27] 叶红,杨红,曹舰艇.尼洋河流域八一镇段土壤 pH 值空间变化特征[J]. *高原农业*, 2018, 2(6):607-611.
- YE H, YANG H, CAO J T. Spatial variation characteristics of soil pH value in bayi Zhen section of niyang river basin [J]. *Journal of Plateau Agriculture*, 2018, 2(6):607-611.
- [28] 杨玉海,蒋平安,艾尔肯,等.种植苜蓿对土壤肥力的影响[J]. *干旱区地理*, 2005, 28(2):248-251.
- YANG Y H, JIANG P A, AI E K, et al. Effects of planting medicago sativa lon soil fertility[J]. *Arid Land Geography*, 2005, 28(2):248-251.
- [29] ZHANG Y, BHATTACHARYYA R, FINN D, et al. Soil carbon, nitrogen, and biotic properties after long-term no-till and nitrogen fertilization in a subtropical Vertisol[J]. *Soil and Tillage Research*, 2023, 227:e105614.
- [30] 杜天庆,苗果园,郝建平,等.黄土母质生土上 4 种豆科

- 牧草根系生长特征的研究[J].草地学报,2012,20(1):17-22.
- DU T Q, MIAO G Y, HAO J P, et al. Root growth characteristics of four species leguminous forage in immature loess subsoil[J]. Acta Agrestia Sinica, 2012, 20(1):17-22.
- [31] 郭丰辉,丁勇,马文静,等.紫花苜蓿个体性状对土壤磷素供给能力的响应研究[J].草原与草坪,2021,41(1):18-25.
- GUO F H, DING Y, MA W J, et al. Response of alfalfa individual traits to soil phosphorus supply level[J]. Grassland and Turf, 2021, 41(1):18-25.
- [32] 刘爽,王雅,刘兵兵,等.晋西北不同土地管理方式对土壤碳氮、酶活性及微生物的影响[J].生态学报,2019,39(12):4376-4389.
- LIU S, WANG Y, LIU B B, et al. Effects of different land management practices on soil carbon and nitrogen, enzyme activities, and microbial diversities northwest of Shanxi[J]. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(12):4376-4389.
- [33] 张红,吕家珑,赵世伟,等.不同植被覆盖下子午岭土壤养分状况研究[J].干旱地区农业研究,2006,24(2):66-69.
- ZHANG H, LÜ J L, ZHAO S W, et al. Studies on soil nutrients under different vegetation types in the Ziwanling Area[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2006, 24(2):66-69.
- [34] 段海芹,秦秦,吕卫光,等.有机肥长期施用对设施土壤全镉和有效态镉含量的影响[J].土壤学报,2021,58(6):1486-1495.
- DUAN H Q, QIN Q, LÜ W G, et al. Effects of long-term application of organic manure on contents of total and available cadmium in greenhouse soil[J]. Acta Pedologica Sinica, 2021, 58(6):1486-1495.
- (上接第 191 页)
- [34] 邓建才,卢信,陈效民,等.封丘地区土壤水分扩散率的研究[J].土壤通报,2005,36(3):317-320.
- DENG J C, LU X, CHEN X M, et al. Soil moisture diffusivity in fengqu region[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2005, 36(3):317-320.
- [35] 刘立超,李守中,宋耀选,等.沙坡头人工植被区微生物结皮对地表蒸发影响的试验研究[J].中国沙漠,2005,25(2):191-195.
- LIU L C, LI S Z, SONG Y X, et al. Effect of microbiotic crust on evaporation process in vegetated area in Shapotou Region[J]. Journal of Desert Research, 2005, 25(2):191-195.
- [36] 张志山,何明珠,谭会娟,等.沙漠人工植被区生物结皮类土壤的蒸发特性:以沙坡头沙漠研究试验站为例[J].土壤学报,2007,44(3):404-410.
- ZHANG Z S, HE M Z, TAN H J, et al. Evaporation from soils covered with biological crusts in revegetated desert: A case study in Shapotou Desert research and experiment station[J]. Acta Pedologica Sinica, 2007, 44(3):404-410.
- [37] 淡晨希,张琼,刘畅,等.生物结皮与草本植物共生坡面的产流-入渗过程特征[J].应用生态学报,2022,33(7):1853-1860.
- DAN C X, ZHANG Q, LIU C, et al. Characteristics of runoff and infiltration processes on slope with intergrown biocrusts and herbs[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2022, 33(7):1853-1860.
- [38] 祝晨佳,高吉喜.土壤蒸发影响因素及抑制途径研究综述[J].环境保护科学,2024,50(4):19-26.
- ZHU C J, GAO J X. A review of the factors affecting soil evaporation and its inhibition methods[J]. Environmental Protection Science, 2024, 50(4):19-26.