

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2024.03.001.

廖娇娇, 窦艳星, 刘良旭, 等. 黄土高原宁南山区土壤养分空间分布特征[J]. 水土保持研究, 2024, 31(3): 101-107.

Liao Jiaojiao, Dou Yanxing, Liu Liangxu, et al. Characteristics of Spatial Distribution of Soil Nutrients in Different Land Uses in Loess Hills[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2024, 31(3): 101-107.

黄土高原宁南山区土壤养分空间分布特征

廖娇娇¹, 窦艳星², 刘良旭³, 王宝荣⁴, 安韶山¹

(1.西北农林科技大学 资源与环境学院, 陕西 杨凌 712100; 2.西北农林科技大学 林学院, 陕西 杨凌 712100;
3.中国科学院 西北生态环境资源研究院, 兰州 730000; 4.西北农林科技大学 草业与草原学院, 陕西 杨凌 712100)

摘要: [目的] 土壤养分含量及其空间分布状况是陆地生态系统健康与可持续发展的重要评价因素, 因此分析土壤养分及其空间特征对该区域的土壤养分管理以及土地可持续利用意义重大。[方法] 在半干旱的宁南山区选取不同土地利用类型为研究对象, 采用地统计学空间插值分析了土壤养分含量及其空间分布特征。[结果] 黄土丘陵不同土地利用类型土壤全量养分均处于中等偏下的水平, 表层 0—20 cm 土壤养分含量均高于 20—40 cm 土层, “表聚效应”明显。整体上, 土壤养分含量基本表现为天然草地 > 柠条 > 山杏 > 裸地 > 梯田 > 退耕草地, 其中天然草地显著高于其他植被类型 ($p < 0.05$)。从土壤养分的空间分布可知, 土壤有机碳含量呈中部低、南北高的状态; 土壤速效磷含量呈中部高、南北低的状态; 土壤硝态氮和铵态氮含量变化趋势则是从南到北逐渐递增。[结论] 人工种植柠条和山杏有利于改善该地区土壤综合质量水平; 因此, 退耕还林(草)的生态恢复措施能够持续、有效改善当地的土壤质量状况。

关键词: 黄土丘陵; 土地利用; 土壤养分; 空间分布

中图分类号: S714.5

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2024)03-0101-07

Characteristics of Spatial Distribution of Soil Nutrients in Different Land Uses in Loess Hills

Liao Jiaojiao¹, Dou Yanxing², Liu Liangxu³, Wang Baorong⁴, An Shaoshan¹

(1.College of Natural Resources and Environment, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 2.College of Forestry, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 3.Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, CAS, Lanzhou 730000, China; 4.College of Grassland Agriculture, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: [Objective] Soil nutrients and their spatial distribution are important ecological factors to ensure ecosystem health. The aim of this study is to analyze the soil nutrients and their spatial characteristics, which is of great significance for soil nutrient management and land sustainable use in this region. [Methods] In this study, different land use types were selected in the semi-arid loess hilly area, and soil nutrients were measured, and analyzed by the geostatistical method. [Results] The results showed that the total soil nutrients of different land uses in the loess hill were at the lower than medium level, and the nutrient content of different land use types in 0—20 cm soil layer was higher than that in 20—40 cm soil layer, showing surface aggregation effect. On the whole, the soil nutrient content showed the order of natural grassland > *Caragana Korshinskii* > apricot > bare land > terrace > grassland, and the soil nutrient content of the natural grassland was significantly higher than that other vegetation types ($p < 0.05$). From the spatial distribution of soil nutrients, it can be seen that soil organic carbon content is low in the middle and high in the north and

收稿日期: 2023-06-05

修回日期: 2023-07-04

资助项目: 国家自然科学基金项目 (42077072; 42307440); 甘肃省自然科学基金 (22JR5RA075); 陕西省博士后基金特别资助项目 (2023BSHTBZZ27)

第一作者: 廖娇娇 (1988—), 女, 湖北襄阳人, 博士研究生, 主要从事土壤学和水土保持研究。E-mail: jiaojiao_liao@163.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, 主要从事土壤生态学及水土保持效益评价研究工作。E-mail: shan@ms.iswc.ac.cn

<http://stbcyj.paperonce.org>

south. Soil available P content was high in the middle and low in the north and south. Soil nitrate nitrogen and ammonium nitrogen contents increased gradually from south to north. [Conclusion] The artificial planting of *Caragana Korshinskii* and apricot was beneficial to improve the comprehensive level of soil quality in this area. Therefore, land conservation measures such as returning farmland to forest (grass) can continuously improve local soil quality.

Keywords: loess hills; land use; soil nutrients; spatial distribution

黄土高原宁南山区在人类活动和自然环境的共同作用下,降水呈少而集中的特征;该区域地表破碎,土壤质地松散,抗蚀性能差,土壤侵蚀和水土流失严重,生态环境脆弱,一直以来都被列为我国生态系统重点恢复和重建区域^[1-3]。一般而言,植被生长与土壤养分状况之间有着密切的关系,土壤养分不足、分配不均衡都会极大地限制植被生长^[4]。与此同时,在人类活动剧烈影响下,该区域土壤资源呈现出高度时空变异的特性^[5]。

人类对土地利用方式的转变会直接影响植物源有机碳的输入,进而引起土壤微生物群落结构和功能的改变,土壤有机质的转化与积累受微生物的调控,最终导致土壤有机碳库发生改变^[6-7]。土壤养分含量及其空间分布特征随土地利用方式的改变而改变^[8],探明不同植被模式下土壤养分的变化规律,阐释土壤养分与植被间的相互调节机制,对于恢复和重建黄土高原生态系统具有重要的指导价值。

长期以来,由于生态环境脆弱,黄土高原宁南山区经济发展滞后,仍然是我国生态贫困地区之一^[9]。新中国成立以来,该区域实施了大量的生态工程重建项目,然而对该区域的生态与经济状况改善并不理想,亟需借助西部大开发的契机,寻求更为有效的经济发展路径,以快速促进经济发展和生态恢复,实现黄土高原地区的可持续建设^[10]。土壤养分含量及其空间分布状况是陆地生态系统健康与可持续发展的重要评价因素,因此分析土壤养分及其空间特征对该区域的土壤养分管理以及土地可持续利用意义重大。因此,本文选择典型的宁南山区(河川乡),通过大量的资料清查、野外调查和室内检测分析,借助经典统计学、地统计学原理与 GIS 等方法,探究不同植被模式下土壤养分空间分布,旨在为该区域的土地管理与利用提供理论指导。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

宁夏固原处于中原农耕与北方游牧交汇的脆弱带,是我国北方典型的贫困地区,同时也是土壤侵蚀和水土流失非常严重的区域之一,包含固原市的 6 个县(分别为西吉县、泾源县、彭阳县、海原县、隆德县和原州区)和吴忠市的 3 个县(分别为同心县、盐

池县和红寺堡开发区),亦称作西海固地区。2002 年底人口统计为 238.32 万,在全区人口比例中占比 44.4%,面积达全区总面积的 58.8%。

河川乡经济落后,地区贫困,产业结构单一,目前仍然是自给和半自给的劳动模式占主导地位,农民收入主要依靠农业,但耕作形式简单粗放,广种薄收,低层次、低效率的农业生产模式导致该区域经济发展落后。宁南山区的贫困类型以“生存型”为主,人多地少、靠天吃饭的经济模式一旦遇到自然灾害的袭击,就会造成一部分人重回饥寒境地,该区生活困难,脱贫难度大,返贫率高。宁南山区的人口年龄主要是“年轻型”,适龄劳动人口比重大,而土地能容纳的劳动力极为有限,目前农业生产的方式仍以原始的牛耕人种为主。

1.2 样品采集

本研究采取定位观测、野外试验和模拟试验相结合,2017 年 8 月选取固原市河川乡自然恢复、柠条(包括平茬)、乔灌结合(山桃、山杏)、农地和经济林等 5 种经营模式(图 1),在每种经营模式中设置 3 个平行样地,每个样地再设置 3 个重复采样点,按照“S”形路线(五点混合法)采集 0—20 cm、20—40 cm 两个深度土壤样品进行养分测定、团聚体稳定性及可蚀性分析等。记录每个采样点的经纬度、海拔、坡度、坡向等基本信息。

1.3 项目测定

将采集的土壤样品带回实验室,自然风干 15 d 后,过 2 mm 的筛子,去除根系、石砾等杂质,然后测定土壤理化指标和持水特性。另采集原位土壤样品测定土壤团聚体。

pH 采用电导仪法;含水量采用烘干法;容重采用坡面挖取的方法;有机碳采用重铬酸钾—外加热法;全磷采用 $H_2SO_4-HClO_4$ 消解法;硝态氮和铵态氮采用 KCl 浸提—连续流动分析仪法;速效磷采用 $NaHCO_3$ 浸提—钼锑抗比色法^[11];采用 Torri.D 模型计算土壤可蚀性 K 值^[12-13],使用统一的土壤质地定量参数:

$$K = 0.0293(0.65 - Dg + 0.24 Dg^2) \\ e^{\{-0.0021 OM/c - 0.00037(OM/c)^2 - 4.02 + 1.72c^2\}}$$

式中: K 值单位为 $[t \cdot hm^2 \cdot h / (MJ \cdot mm \cdot hm^2)]$ ^[14]。OM 是土壤有机质含量百分数; c 是 <0.002 mm 的黏粒含量,用小数表示。

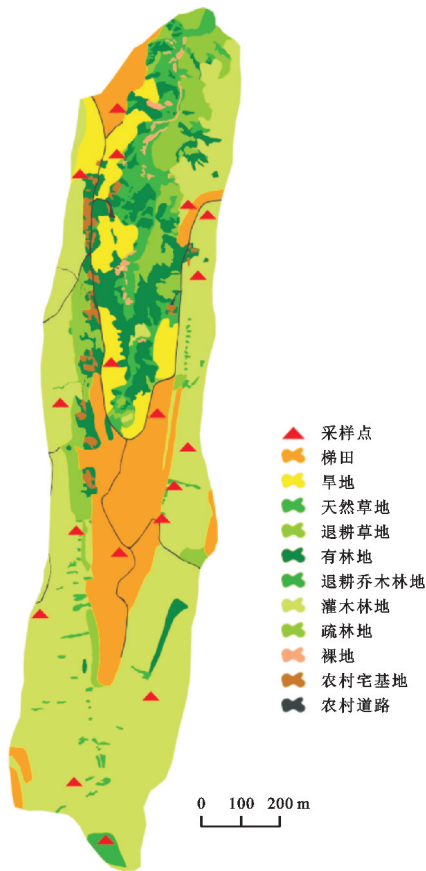


图1 采样点分布

Fig. 1 Sampling sites

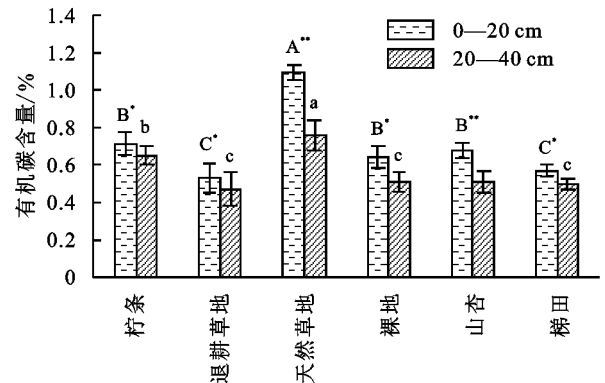
2 结果与分析

2.1 不同土地利用土壤有机碳含量与储量

土壤有机碳主要包括动植物残体、微生物残体及其代谢产生的全部有机物质,在土壤中占比虽少,但却是土壤的重要组成部分,在调控土壤理化性质、土壤肥力方面发挥着重要作用。土壤有机碳的转化和积累受土壤水分、土壤热特性、有机肥施入量、耕作措施等多方面因素的影响,是土壤肥力的物质基础。由图2可知,对于0—20 cm土层,不同土地利用土壤有机碳含量基本表现为天然草地>柠条>山杏>裸地>梯田>退耕草地,其中天然草地显著高于其他植被类型($p<0.05$),柠条、山杏、裸地土壤有机碳含量差异不显著($p>0.05$),梯田和退耕草地差异不显著($p>0.05$);对于20—40 cm土层,不同土地利用土壤有机碳含量基本表现为天然草地>柠条>裸地>山杏>梯田>退耕草地,其中天然草地显著高于其他植被类型($p<0.05$),裸地、山杏、退耕草地、梯田差异不显著($p>0.05$)。不同土地利用类型表层(0—20 cm)土壤有机碳含量均显著高于20—40 cm土层土壤有机碳含量($p<0.05$)。土壤有机碳含量的空间分布图显示,土壤有机碳含量呈中部低,南北高的状态。

由图3可知,对于0—20 cm土层,不同土地利用

土壤有机碳储量基本表现为天然草地>柠条>山杏>裸地>梯田>退耕草地,其中天然草地显著高于其他植被类型($p<0.05$),柠条、山杏、裸地、梯田土壤有机碳储量差异不显著($p>0.05$);对于20—40 cm土层,不同土地利用土壤有机碳储量基本表现为天然草地>柠条>山杏>裸地>梯田>退耕草地,其中天然草地显著高于其他植被类型($p<0.05$),山杏、柠条差异不显著($p>0.05$)。不同土地利用类型表层(0—20 cm)土壤有机碳储量均显著高于20—40 cm土层($p<0.05$)。土壤有机碳储量的变化趋势与有机碳含量一致,呈中部低,南北高的状态。



注:不同大写字母表示0—20 cm土层不同植被类型差异显著($p<0.05$),不同小写字母表示20—40 cm土层不同植被类型差异显著($p<0.05$),下同。

图2 不同土地利用土壤有机碳含量

Fig. 2 Soil organic carbon content in different land use types

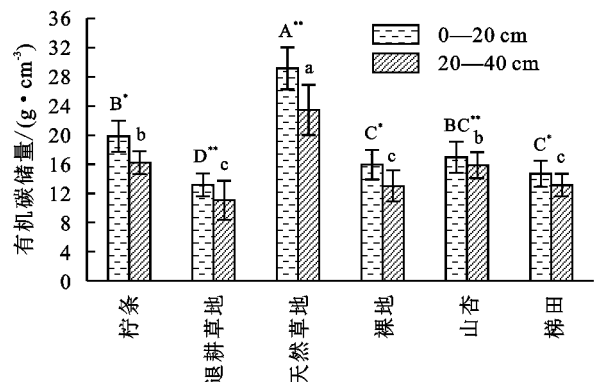


图3 不同土地利用土壤有机碳储量

Fig. 3 Soil organic carbon storage in different land use types

2.2 不同土地利用土壤全磷含量

由图4可知,对于0—20 cm土层,不同土地利用土壤全磷含量基本表现为梯田>天然草地>柠条>山杏>裸地>退耕草地,其中不同土地利用土壤全磷含量差异不显著($p>0.05$);对于20—40 cm土层,不同土地利用土壤全磷含量基本表现为退耕草地>天然草地>柠条>裸地>山杏>梯田,其中不同土地利用土壤全磷含量差异不显著($p>0.05$)。不同土地利用类型表层(0—20 cm)土壤全磷含量均显著高于20—40 cm土层($p<0.05$)。从土壤全磷的空间分布图可知,土壤全磷含量由南向北逐渐降低。

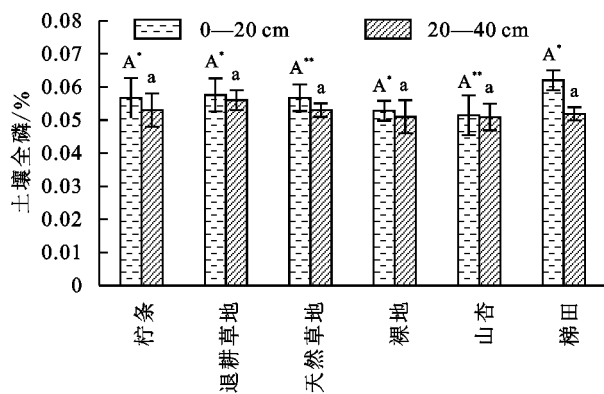


图 4 不同土地利用土壤全磷含量

Fig. 4 Soil total phosphorus content in different land use types

2.3 不同土地利用土壤速效磷含量

由图 5 可知,对于 0—20 cm 土层,不同土地利用土壤速效磷含量基本表现为梯田>山杏>柠条>退耕草地>天然草地>裸地,其中梯田和山杏显著高于其他植被类型($p<0.05$),柠条、退耕草地、天然草地土壤速效磷含量差异不显著($p>0.05$);对于 20—40 cm 土层,不同土地利用土壤速效磷含量基本表现为梯田>山杏>柠条>退耕草地>天然草地>裸地,其中梯田和山杏显著高于其他植被类型($p<0.05$),退耕草地、天然草地、裸地差异不显著($p>0.05$)。不同土地利用类型表层(0—20 cm)土壤速效磷含量均显著高于 20—40 cm 土层($p<0.05$)。从土壤速效磷含量的空间分布图可知,土壤速效磷含量呈中部高,南北低的状态。

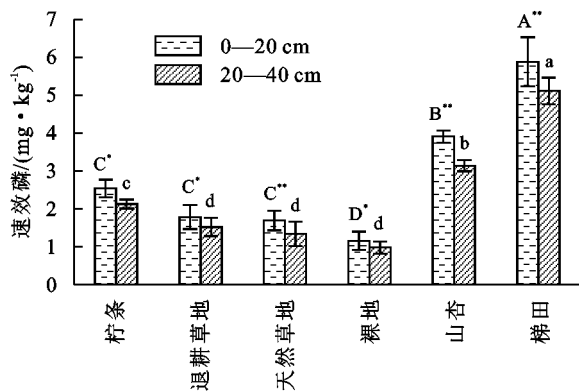


图 5 不同土地利用土壤速效磷含量

Fig. 5 Soil available phosphorus content in different land use types

2.4 不同土地利用土壤硝态氮含量

由图 6 可知,对于 0—20 cm 土层,不同土地利用土壤硝态氮含量基本表现为梯田>柠条>天然草地>退耕草地>裸地>山杏,其中梯田和柠条显著高于其他植被类型($p<0.05$);对于 20—40 cm 土层,不同土地利用土壤硝态氮含量基本表现为梯田>柠条>退耕草地>天然草地>裸地>山杏,其中梯田和柠条显著高于其他植被类型($p<0.05$),天然草地和退耕草地差异不显著($p>0.05$)。不同土地利用 0—20 cm 土层土壤

硝态氮含量均显著高于 20—40 cm 土层土壤硝态氮含量($p<0.05$)。从土壤硝态氮含量的空间分布图可知,土壤硝态氮含量由南向北逐渐增加趋势。

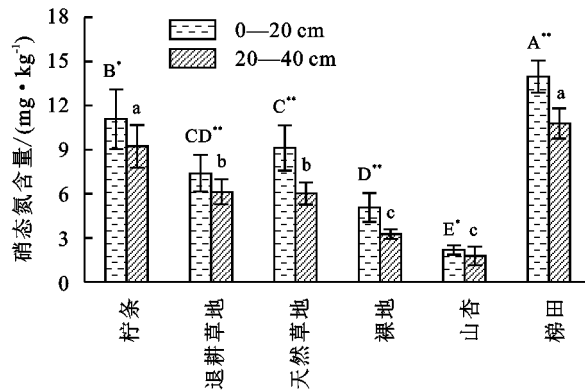


图 6 不同土地利用土壤硝态氮含量

Fig. 6 Soil nitrate nitrogen content in different land use types

2.5 不同土地利用土壤铵态氮含量

由图 7 可知,对于 0—20 cm 土层,不同土地利用土壤铵态氮含量基本表现为梯田>天然草地>退耕草地>柠条>裸地>山杏,其中梯田和天然草地显著高于其他植被类型($p<0.05$),柠条、裸地和山杏土壤铵态氮含量差异不显著($p>0.05$);对于 20—40 cm 土层,不同土地利用土壤铵态氮含量基本表现为梯田>退耕草地>天然草地>柠条>裸地>山杏,其中梯田和退耕草地显著高于其他植被类型($p<0.05$),山杏、柠条、天然草地、裸地差异不显著($p>0.05$)。不同土地利用 0—20 cm 土层土壤铵态氮含量均显著高于 20—40 cm 土层土壤铵态氮含量($p<0.05$)。从土壤铵态氮含量的空间分布图可知,土壤铵态氮含量由南向北逐渐增加趋势。

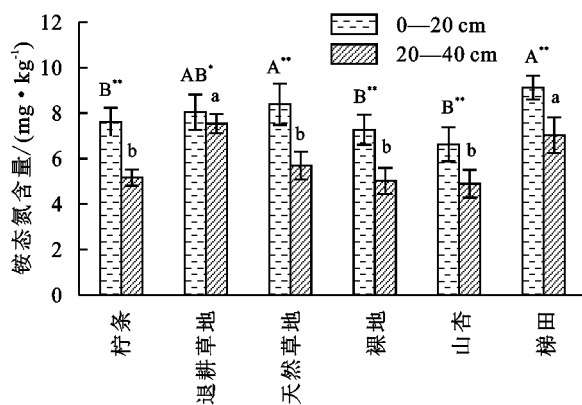


图 7 不同土地利用土壤铵态氮含量

Fig. 7 Soil ammonium nitrogen content in different land use types

2.6 不同土地利用团聚体稳定性

由图 8 可知,不同土地利用 0—20 cm, 20—40 cm 土层土壤团聚体各粒级变化规律一致,均是 0.05~0.10 mm 团聚体占比最高,0.5~2.0 mm 团聚体占比最低。柠条、退耕草地和天然草地的黏粒(<0.002

mm)含量较高,山杏沙粒(0.05~2.0 mm)含量占粒径组成的70%以上,柠条、退耕草地和天然草地沙粒

含量较低。20—40 cm 土壤团聚体各粒级变化规律与0—20 cm 土层保持一致。

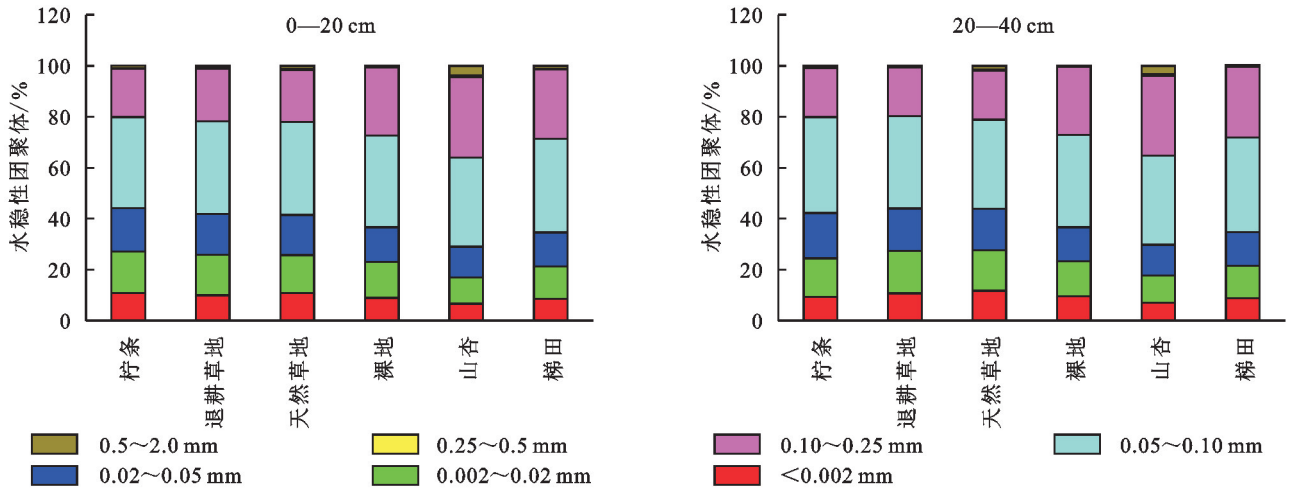


图8 不同土地利用土壤团聚体稳定性

Fig. 8 Soil aggregates stability in different land use types

2.7 不同土地利用土壤可蚀性

平均重量直径(DMW)可以用来评价团聚体稳定性,值越大,代表团聚体越稳定。由图9可知,对于0—20 cm 土层,不同土地利用 DMW 基本表现为梯田>柠条>山杏>退耕草地>天然草地>裸地,其中梯田显著高于其他植被类型($p<0.05$),柠条、和山杏 DMW 差异不显著($p>0.05$);对于20—40 cm 土层,不同土地利用 DMW 基本表现为梯田>柠条>山杏>退耕草地>天然草地>裸地,其中梯田、柠条和山杏显著高于其他植被类型($p<0.05$),梯田、山杏、柠条差异不显著($p>0.05$)。不同土地利用0—20 cm

土层 DMW 均显著高于20—40 cm 土层。

根据公式计算土壤可蚀性K值,其均值如下图所示,对于0—20 cm 土层,不同土地利用土壤K值基本表现为裸地>梯田>退耕草地>山杏>柠条>天然草地,其中裸地显著高于其他植被类型($p<0.05$);对于20—40 cm 土层,不同土地利用土壤K值基本表现为裸地>梯田>山杏>退耕草地>柠条>天然草地,其中裸地显著高于其他植被类型($p<0.05$)。不同土地利用0—20 cm 的K值均显著低于20—40 cm 土层。由此表明天然草地的土壤抗侵蚀能力相对较强,裸地最弱。

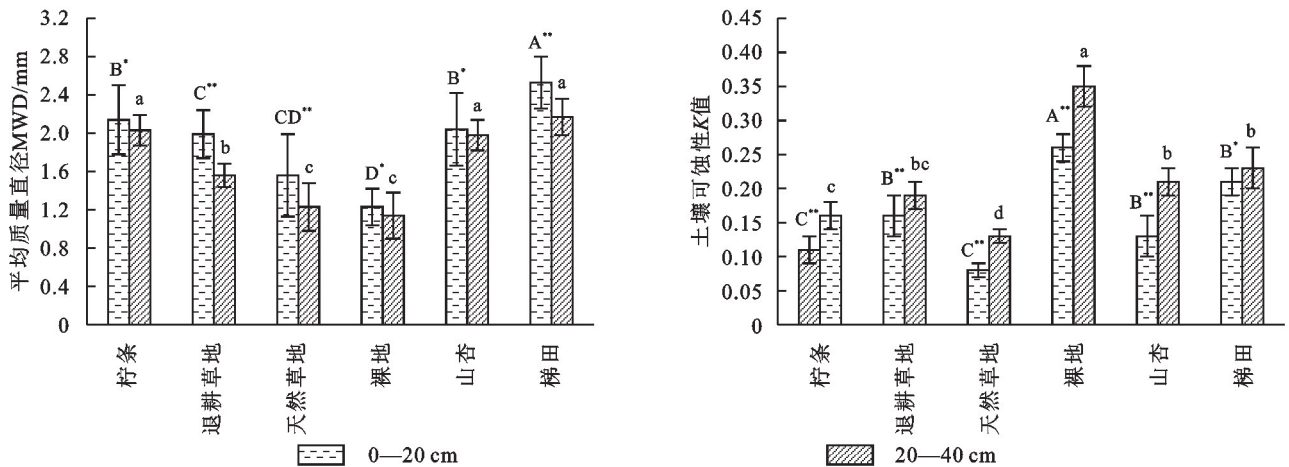


图9 不同土地利用土壤可蚀性

Fig. 9 Soil erodibility in different land use types

3 讨论与结论

宏观和微观尺度均显示土壤养分均存在明显的空间变异性,这是土壤的一个重要属性^[15]。宁南山区河川乡土壤养分因受母质、地形等自然因素的影响

出现强烈的空间变异性,这与方炫等^[16]和张振国等^[17]的研究结果一致,也与当地土地普遍施肥相吻合。河川乡表层土壤养分含量处于中等水平,与薛志婧等^[15]在该区域的研究相比,土壤有机质、全氮、全磷含量均有所上升,说明生态治理措施有效改善了土

壤养分的质量;土壤碳和氮在生物地球化学循环过程中关系紧密,因此天然全氮和有机碳的空间结构较为相似^[18-19],全磷含量主要受土壤母质中矿物的影响,导致不同土地利用土壤全磷差异不显著。

河川乡土壤有机碳和全氮含量的空间分布规律较为相似。此前已有研究证实土壤养分的空间分布与各种环境因子密切相关,但具体结论有所差异,王宝荣等^[20]认为海拔是主要控制因素,郭曼等^[21]则认为退耕年限是主要控制因素。而本研究认为土壤养分的空间分布受土壤、植被和周围环境共同调控。随着农业结构调整和水土流失治理等各项生态修复措施的实施,河川乡不断优化土地利用方式,由原来的以农耕地为主逐渐向草地、林地转化,天然草地的凋落物和腐殖质显著高于梯田和退耕草地,进而导致天然养分大致表现为天然草地>柠条>山杏>裸地>梯田>退耕草地。植被与土壤相互作用促进了植物群落的演替,枯落物和根系分泌物进入土壤中,影响土壤有机碳的积累,改变土壤养分含量,土壤养分反过来又决定植被的生长^[22]。在本研究中,天然草地的养分含量对比灌木林、乔木林和退耕草地明显更高,林地中灌木林的养分高于乔木林,说明土壤养分受植被类型的影响。安韶山等^[23]、成毅等^[24]的研究表明,对比乔木和灌木,草本植物更能增加表层土壤的养分,这与本研究的天然草地养分含量更高的结果一致。

土壤生态系统既是碳源又是碳汇,土地利用类型是碳循环的重要影响因子。土地利用方式与土壤水分、养分之间关系密切,土地利用方式的转变必然会改变土壤养分含量^[18-19]。作为水土流失最为严峻的区域之一,黄土高原一直是我国生态建设的重点,绿化荒山、小流域综合治理、退耕还林还草、耕地撂荒等生态修复措施极大地促进了黄土高原植被恢复,改变了黄土高原的土地利用方式,对生态系统重建发挥积极影响^[16-17]。尤其是大规模实施的退耕还林(草)工程,使黄土高原由原有的农耕地逐渐转化为大面积的人工林地和人工草地^[23]。近年来,人口结构老龄化和农村劳动力转移导致大量耕地闲置,造成一定比例的撂荒地。大量研究结果已证实植被恢复会影响土壤养分含量和分布^[19-24],由此可知,黄土丘陵区植物和土壤相互作用密切,植被恢复促进土壤有机质积累,而土壤养分的改善反过来又有利于植被的生长。

综上,黄土丘陵不同土地利用类型土壤全量养分均处于中等偏下的水平,且表层0—20 cm土壤养分含量均高于20—40 cm土层,“表聚效应”明显。整体上,土壤养分含量基本表现为天然草地>柠条>山杏>裸地>梯田>退耕草地,其中天然草地显著高于

其他植被类型($p<0.05$)。从空间分布可知,土壤有机碳含量呈中部低,南北高的状态;土壤速效磷含量呈中部高,南北低的状态。土壤硝态氮、铵态氮含量由南向北逐渐增加趋势。土壤综合质量指数总体上为中等水平,土壤肥力综合质量在退耕草地、人工种植柠条和山杏林较高,裸地较低;人工种植柠条和山杏有利于改善该地区土壤综合质量水平。因此,退耕还林(草)的生态恢复措施能够持续有效改善当地的土壤质量状况。

参考文献(References):

- [1] An S S, Darboux F, Cheng M. Revegetation as an efficient means of increasing soil aggregate stability on the Loess Plateau(China)[J]. *Geoderma*, 2013,209:75-85.
- [2] An S S, Mentler A, Mayer H, et al. Soil aggregation, aggregate stability, organic carbon and nitrogen in different soil aggregate fractions under forest and shrub vegetation on the Loess Plateau, China[J]. *Catena*, 2010,81(3):226-233.
- [3] Yang Y, Dou Y X, Huang Y M, et al. Links between soil fungal diversity and plant and soil properties on the Loess Plateau[J]. *Frontiers in Microbiology*, 2017,8:2198.
- [4] Fu B J, Wang S, Liu Y H, et al. Hydrogeomorphic ecosystem responses to natural and anthropogenic changes in the Loess Plateau of China[J]. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 2017,45:223-243.
- [5] Cheng M, Xiang Y, Xue Z J, et al. Soil aggregation and intra-aggregate carbon fractions in relation to vegetation succession on the Loess Plateau, China[J]. *Catena*, 2015,124:77-84.
- [6] Wu X, Xu H, Tuo D, et al. Land use change and stand age regulate soil respiration by influencing soil substrate supply and microbial community[J]. *Geoderma*, 2020, 359:113991.
- [7] Xue Z, Cheng M, An S S. Soil nitrogen distributions for different land uses and landscape positions in a small watershed on Loess Plateau, China[J]. *Ecological Engineering*, 2013,60:204-213.
- [8] Fang X, Xue Z J, Li B, et al. Soil organic carbon distribution in relation to land use and its storage in a small watershed of the Loess Plateau, China[J]. *Catena*, 2012,88(1):6-13.
- [9] Fu B J. Soil erosion and its control in the Loess Plateau of China[J]. *Soil Use and Management*, 1989,5(2):76-82.
- [10] Feng X M, Fu B J, Piao S L, et al. Revegetation in China's Loess Plateau is approaching sustainable water resource limits[J]. *Nature Climate Change*, 2016,6(11):1019-1022.

- [11] 鲍士旦,秦怀英,劳家桢.土壤农化分析[M].北京:科学出版社,1988.
Bao S D, Qin H Y, Lao J C. Agrochemical analysis of soil[M]. Peking: Science Press, 1988.
- [12] 林芳,朱兆龙,曾全超,等.延河流域3种土壤可蚀性K值估算方法比较[J].土壤学报,2017,54(5):1136-1146.
Lin F, Zhu Z L, Zeng Q C, et al. Comparative study of three different methods for estimation of soil erodibility K in Yanhe watershed of China[J]. Acta Pedologica Sinica, 2017,54(5):1136-1146.
- [13] 安韶山,张玄,张扬,等.黄土丘陵区植被恢复中不同粒级土壤团聚体有机碳分布特征[J].水土保持学报,2007,21(6):109-113.
An S S, Zhang X, Zhang Y, et al. Distribution of organic carbon in different soil aggregates size during revegetation in hilly-gully region of Loess Plateau[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2007,21(6):109-113.
- [14] 刘雷,安韶山,黄华伟.应用LeBissonnais法研究黄土丘陵区植被类型对土壤团聚体稳定性的影响[J].生态学报,2013,33(20):6670-6680.
Liu L, An S S, Huang H W. Application of LeBissonnais method to study soil aggregate stability under different vegetaion on the Loess Plateau[J]. Acta Ecologica Sinica, 2013,33(20):6670-6680.
- [15] 薛志婧,侯晓瑞,程曼,等.黄土丘陵区小流域尺度上土壤有机碳空间异质性[J].水土保持学报,2011,25(3):160-163.
Xue Z J, Hou X R, Cheng M, et al. Spatial variability of soil organic carbon in catchment scale of Loess hilly area[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2011, 25(3):160-163.
- [16] 方炫,安韶山,薛志婧,等.基于最大似然法与矩法的黄土高原小流域土壤碳氮空间变异分析[J].水土保持通报,2014,34(4):141-146.
Fang X, An S S, Xue Z J, et al. Analysis on spatial variability of soil organic carbon and nitrogen based on REML and MOM in a small watershed on Loess Plateau[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2014, 34(4):141-146.
- [17] 张振国,黄建成,焦菊英,等.黄土丘陵沟壑区退耕地人工柠条林土壤养分特征及其空间变异[J].水土保持通报,2007,27(4):114-120.
Zhang Z G, Huang J C, Jiao J Y, et al. Characteristics, spatial variability and evolution of soil nutrients on abandoned artificial forest(*Caragana Korshinskii*) lands in the Loess hilly region[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2007,27(4):114-120.
- [18] 杨阳,刘秉儒,宋乃平,等.人工柠条灌丛密度对荒漠草原土壤养分空间分布的影响[J].草业学报,2014,23(5):107-115.
Yang Y, Liu B R, Song N P, et al. The effect of planted Caragana density on the spatial distribution of soil nutrients in desert steppe[J]. Acta Prataculturae Sinica, 2014,23(5):107-115.
- [19] 杨阳,刘秉儒,翟德苹,等.人工柠条灌丛行间距对荒漠草原土壤有机碳含量空间分布的影响[J].水土保持学报,2014,28(1):141-146.
Yang Y, Liu B R, Zhai D P, et al. Effect of row distance of artificial Caragana korshinskii shrub on spatial distribution of soil organic carbon in desert steppe[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2014,28(1):141-146.
- [20] 王宝荣,杨佳佳,张海鑫,等.黄土丘陵区植被与地形特征对土壤和土壤微生物生物量生态化学计量特征的影响[J].应用生态学报,2018,29(1):122-128.
Wang B R, Yang J J, Zhang H X, et al. Effects of vegetation and topography features on ecological stoichiometry of soil and soil microbial biomass in the hilly-gully region of the Loess Plateau, China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2018,29(1):122-128.
- [21] 郭曼,郑粉莉,和文祥,等.黄土丘陵区不同退耕年限植被多样性变化及其与土壤养分和酶活性的关系[J].土壤学报,2010,5(8):979-986.
Guo M, Zheng F L, He W X, et al. Variation of vegetation diversity and its relationship with soil nutrient and enzyme activity in lands of different abandoned years in the Loess hilly-gully region[J]. Acta Pedologica Sinica, 2010,5(8):979-986.
- [22] 向云,程曼,安韶山,等.延河流域不同立地条件下植物—枯落物—土壤生态化学计量学特征[J].自然资源学报,2015,30(10):1642-1652.
Xiang Y, Cheng M, An S S, et al. Soil-plant-litter stoichiometry under different site conditions in Yanhe catchment, China[J]. Journal of Natural Resources, 2015,30(10):1642-1652.
- [23] 安韶山,刘梦云,李璧成,等.宁南山区不同植被恢复措施的土壤养分效应研究[J].西北植物学报,2003,23(8):1429-1432.
An S S, Liu M Y, Li B C, et al. Effect of different vegetation restoration on soil nutrient changes in Southern Ningxia mountain region[J]. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica, 2003,23(8):1429-1432.
- [24] 成毅,安韶山,李国辉,等.宁夏黄土丘陵区植被恢复对土壤养分和微生物生物量的影响[J].中国生态农业学报,2010,18(2):261-266.
Cheng Y, An S S, Li G H, et al. Soil nutrient and microbial biomass in the Loess hilly area of Ningxia under different plant rehabilitation patterns[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2010,18(2):261-266.