

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2024.01.043.

崔梦莹, 周荣磊, 郑诚, 等. 黄土丘陵区草地地上生物量及土壤水分养分对微地形变化的响应[J]. 水土保持研究, 2024, 31(1): 18-26.

Cui Mengying, Zhou Ronglei, Zheng Cheng, et al. Responses of Aboveground Biomass and Soil Moisture and Nutrients to Microtopographic Changes in Grassland in the Loess Hilly Region[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2024, 31(1): 18-26.

# 黄土丘陵区草地地上生物量及土壤水分养分 对微地形变化的响应

崔梦莹<sup>1</sup>, 周荣磊<sup>1</sup>, 郑诚<sup>1</sup>, 魏嘉琪<sup>1</sup>, 万锦枫<sup>1</sup>, 赵一帆<sup>1</sup>, 温仲明<sup>1,2</sup>

(1.西北农林科技大学 草业与草原学院, 陕西 杨凌 712100;

2.中国科学院 教育部水土保持与生态环境研究中心, 陕西 杨凌 712100)

**摘要:** [目的]深入了解地形变化对草地生产力及土壤水分养分的影响,为草地生态系统地形复杂地区的生态恢复以及生产力的维持提供参考和依据,对草地生态系统的合理利用与科学管理具有重要意义。[方法]以黄土丘陵区草地生态系统为研究对象,采用单因素方差分析、Duncan 多重比较以及 Pearson 相关分析等方法对6个不同微地形下的草地地上生物量及0—40 cm的土壤有机碳、全氮、全磷含量和0—100 cm的土壤水分含量进行了研究。[结果] (1)在阳坡,地上生物量随坡位的降低逐渐减少且呈极显著差异,土壤有机碳和全氮含量都随坡位的降低而减小,土壤全磷含量随坡位的降低呈“V”字形变化;在阴坡,地上生物量随坡位的降低呈现增加的趋势,土壤全磷含量随坡位降低而增大。土壤有机碳、全氮及全磷含量在不同坡向、坡位上均有显著性差异。(2)土壤有机碳、全氮及全磷含量均随土层加深而减小,其中全磷含量变化不明显;6种微地形的平均水分含量均随土层深度的加深而增加,且在大于40 cm土层上,6种微地形的土壤水分含量之间有显著差异。(3)相关性分析表明,0—20 cm土层的全磷与地上生物量呈显著负相关,20—40 cm土层的有机碳与地上生物量呈显著正相关,40—80 cm土层的土壤水分含量与地上生物量呈极显著正相关。由多元线性回归分析方程可知,在垂直高度的表层土层中土壤有机碳、全磷及土壤水分含量的共同作用对地上生物量有一定的影响,解释度为69.4%。[结论]微地形对地上生物量及土壤有机碳、全氮、全磷含量和土壤水分含量的分布格局有显著的分配作用,在表层土层中土壤有机碳、全磷和土壤水分含量与地上生物量有显著相关性,对地上生物量有一定程度的影响。

**关键词:**草地生态系统;微地形;土壤有机碳;土壤全氮;土壤全磷;土壤含水量;地上生物量

中图分类号:S812.2

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2024)01-0018-09

## Responses of Aboveground Biomass and Soil Moisture and Nutrients to Microtopographic Changes in Grassland in the Loess Hilly Region

Cui Mengying<sup>1</sup>, Zhou Ronglei<sup>1</sup>, Zheng Cheng<sup>1</sup>, Wei Jiaqi<sup>1</sup>,

Wan Jinfeng<sup>1</sup>, Zhao Yifan<sup>1</sup>, Wen Zhongming<sup>1,2</sup>

(1.College of Grassland Agriculture, Northwest A&F University, Yangling,

Shaanxi 712100, China; 2.Research Center of Soil and Water Conservation and Ecological

Environment, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Education, Yangling, Shaanxi 712100, China)

**Abstract:** [Objective] In complex terrain areas, it is of great significance for rational utilization and scientific management of grassland ecosystem to understand the impact of terrain changes on grassland productivity and soil moisture and nutrients, so as to provide reference and basis for ecological restoration and productivity maintenance in complex terrain areas of grassland ecosystem. [Methods] The grassland ecosystem in the

收稿日期:2022-11-05

修回日期:2022-12-07

资助项目:国家自然科学基金项目“黄土丘陵区沟壑区植被水沙拦截效率变化与水文连通性响应”(41977077)

第一作者:崔梦莹(1997—),女,陕西杨凌人,在读研究生,研究方向:草地生态学研究。E-mail:cuimengying@nwfau.edu.cn

通信作者:温仲明(1969—),男,陕西定边人,博士,研究员,主要从事植物生态恢复方面的研究。E-mail:zmwen@ms.iswc.ac.cn

<http://stbcj.paperonice.org>

loess hilly area was taken as the research object, the above ground biomass of grassland, the contents of soil organic carbon, total nitrogen and total phosphorus of 0—40 cm and soil moisture of 0—100 cm were studied by using one-way analysis of variance, Duncan's multiple comparison and Pearson correlation analysis. [Results] (1) On the sunny slope, aboveground biomass decreased gradually with the decrease of slope position and showed a highly significant difference. The contents of SOC and STN decreased with the slope position decreasing, and the content of STP changed in a V-shaped pattern with the decrease of slope position. On the shady slope, aboveground biomass showed an increasing trend with the decrease of slope position. The content of STP increased with the decrease of the slope position. There were significant differences in SOC, STN and STP contents in different slope directions and positions. (2) The contents of SOC, STN and STP all decreased with the deepening of soil layer, and the content of total phosphorus didn't change significantly. The average moisture contents of the six microtopography increased with the increase of soil depth, and there were significant differences among the soil moisture contents of the six microtopography in the soil layer greater than 40 cm. (3) Correlation analysis showed that STP in 0—20 cm soil layer was significantly negatively correlated with aboveground biomass, SOC in 20—40 cm soil layer was significantly positively correlated with aboveground biomass, and SWC in 40—80 cm soil layer was significantly positively correlated with aboveground biomass. The multiple linear regression analysis equation showed that the combined effect of SOC, STP and SWC in the topsoil layer at vertical height had the effect on aboveground biomass with an explanation of 69.4%. [Conclusion] Microtopography had a significant distribution effect on aboveground biomass, soil organic carbon, total nitrogen, total phosphorus and soil moisture contents. In the topsoil layer, soil organic carbon, total phosphorus and soil moisture contents were significantly correlated with aboveground biomass, and had a certain influence on aboveground biomass.

**Keywords:** grassland ecosystem; microtopography; SOC; STN; STP; SWC; aboveground biomass

草地生态系统是畜牧业赖以生存和发展的重要物质基础,它覆盖了全球约 40% 的陆地表面,为人类提供净初级物质生产,在水土保持、调节气候、保护生物多样性中发挥着不可替代的作用<sup>[1]</sup>。草地生态系统是黄土丘陵区重要的生态系统类型之一,面积占比约 37.51%<sup>[2]</sup>,在保障该区生态安全及畜牧业生产中发挥着极为重要的作用。但该区地形复杂多变,生境类型众多,草地生态环境差异较大,对草地的合理利用与管理提出了挑战。因为地形变化导致的环境异质性<sup>[3]</sup>,使得植被与环境演化过程也存在较大差异。这些差异不仅体现在植被变化上,也体现在植被与土壤整体演化上,往往表现为草地生产力及土壤理化属性的差异。

土壤养分是草地生态系统最基本的属性之一,包含大量的碳、氮、磷等营养物质,其含量多少及存在形式是影响植物生长的重要因素,是土壤微生物活动的主要来源,是决定土壤肥力及质量的重要基础物质,不仅对气候变化有着至关重要的作用<sup>[4]</sup>,同时还与草地的生产力密切相关<sup>[5]</sup>。通过对区域尺度上土壤 C, N, P 含量的研究可以反映出植物生产力的强弱,同时可以阐明生态系统的稳定性和植物养分限制状况。由于地形变化对区域生态过程的重要性,一些研究人

员对地形变化与土壤养分及地上生物量的关系等进行了探讨,如潘成忠等<sup>[6]</sup>对黄土半干旱区坡地研究发现,坡位对土壤水分、养分及地上生物量有很大影响。

黄土丘陵区地形起伏,沟壑纵横,地形对水热条件的再分配作用强烈,形成了生境条件迥异的小生境。近年来,就黄土丘陵区地形变化与植物功能性状响应<sup>[7]</sup>、群落结构组成<sup>[8]</sup>、植物适应策略变化<sup>[9]</sup>、植物叶片碳氮磷<sup>[10]</sup>的影响等方面进行了较多研究,但关于基于黄土丘陵区草地生态系统生产力与土壤水分养分与地形变化的响应研究较少,对于理解地形复杂区草地生产力形成的空间变化及其土壤驱动机制尚有待深入研究。为此,本研究以 2021 年在黄土丘陵区草地生态系统调查的实测数据为基础,对在微地形变化下草地上生物量及 0—40 cm 土壤有机碳、全氮、全磷含量和 0—100 cm 土壤水分含量的变化及关系进行了研究,以期对草地生态系统合理的保护管理,为地形复杂地区的生态恢复以及生产力的维持提供可以借鉴的参考和依据<sup>[11]</sup>。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

研究区位于黄土高原典型丘陵区的延河流域

(36°21′—37°19′ N,108°12′—110°2′ E),气候类型为暖温带半干旱大陆性季风气候,年均温 8.8℃,年均降雨量 505 mm,其中 7—9 月为雨季,其降雨量占全年降雨量七成以上,极端最高和最低温度分别为 39℃和-23℃(2011—2022 年),年日照时数 2 395.6 h,日照百分率 54%,全年无霜期 157 d。该流域温度、降雨梯度变化较大,植被分布呈明显的地带性,从东南向北依次划分为森林区、森林草原区、典型草原区<sup>[12]</sup>。流域平均海拔为 1 371.9 m,沟壑密度为 4.7 万条/km<sup>2</sup>,地形破碎复杂,地形对土壤养分、水分具有强烈的再分配作用,并影响到群落物种组成的空间格局。

1.2 试验设计

于 2021 年 7 月至 8 月,在延河流域北部的典型

草原区进行试验,样方设置采用标准地调查法,选择具有代表性的 3 个样地,在每个样地中寻找人类活动干扰较少、自然植被发育较好的 1 个完整断面,区分坡向和坡位,在不同的坡向于上坡、中坡、下坡各布设 1 个样点,分别为:上坡阳面(TS)、中坡阳面(MS)、下坡阳面(BS)、上坡阴面(TN)、中坡阴面(MN)、下坡阴面(BN),一共 18 个样点(详见表 1)。在所选的样点中按照对角线设置 3 个 1 m×1 m 的草本样方,调查草本物种数、物种名、盖度等。同时记录每个样点的主要植被类型、坡向和坡位,用 GPS 实际测量经纬度、海拔和坡度,并调查每个样方的土壤因子(包括土壤有机碳、土壤全氮、土壤全磷含量和土壤水分含量)。

表 1 样地基本情况  
Table 1 Basic situations of the sample plots

样点	坡向	坡位	纬度 E/(°)	经度 N/(°)	海拔/m	优势种
1	阳面	上坡	37.18	108.89	1500	铁杆蒿、白羊草、焦蒿
2	阳面	中坡	37.18	108.89	1470	白羊草、达乌里胡枝子
3	阳面	下坡	37.18	108.89	1440	二裂委陵菜、百里香
4	阴面	上坡	37.18	108.86	1630	长芒草、草木犀状黄芪
5	阴面	中坡	37.18	108.86	1610	大针茅、草木犀状黄芪
6	阴面	下坡	37.18	108.86	1580	大针茅、百里香、焦蒿
7	阳面	上坡	37.32	108.88	1580	长芒草、焦蒿、铁杆蒿
8	阳面	中坡	37.32	108.88	1570	冷蒿、铁杆蒿、焦蒿
9	阳面	下坡	37.32	108.88	1550	蒙古蒿、达乌里胡枝子
10	阴面	上坡	37.32	108.87	1600	长芒草、百里香
11	阴面	中坡	37.32	108.87	1597	长芒草、百里香、赖草
12	阴面	下坡	37.32	108.87	1590	百里香、大针茅
13	阳面	上坡	37.04	109.21	1360	长芒草
14	阳面	中坡	37.03	109.21	1330	白羊草
15	阳面	下坡	37.02	109.21	1290	白羊草、达乌里胡枝子
16	阴面	上坡	37.03	109.21	1340	达乌里胡枝子、铁杆蒿
17	阴面	中坡	37.03	109.21	1320	旱生芦苇、大针茅
18	阴面	下坡	37.03	109.21	1300	旱生芦苇、达乌里胡枝子

1.3 样品采集

采集植物化学分析样品时,以自然恢复且长势良好的植物群落为研究对象,用枝剪尽量贴近地表,将草本样方中全部的地上植物部分剪下来,装入样品袋并做好标记,带回实验室烘干称量干重(g),用以计算生物量。

1.4 土壤样品采集

土壤采样样点布置与植被样点相同,在每个调查样地内选择 1 个未受人为干扰、植被结构和土壤具有代表性的地段,使用便携式土钻钻取 0—1 m 深的土壤样品,每 20 cm 间隔进行取样,用以土壤水分含量的测定。土壤养分的测定使用土钻法进行取样,剖面按垂直高度 0—10 cm,10—20 cm,20—40 cm 进行分层,每层按照“S”型进行 3 次重复取样后充分混

合,装入塑封袋后编号带回室内,将其过 0.149 mm 筛,去除植物根系和石块等,再使其自然风干,用以土壤养分的测定。

1.5 指标的测定与方法

将在野外采集的植物样品放入 75℃的烘箱中烘 24 h,再称量其干重,然后根据野外样品的采样比例计算出地上生物量(g/m<sup>2</sup>)。土壤有机碳(Soil organic carbon,SOC)采用重铬酸钾外加热法测定<sup>[13]</sup>;土壤全氮(Soil total nitrogen,STN)采用凯氏定氮法,利用定氮仪(KjeltecTM2399,瑞典)测定<sup>[14]</sup>;土壤全磷(Soil total phosphorus,STP),基于土壤样品 NaHCO<sub>3</sub>浸提液,使用钼锑抗比色法用分光光度计(Hitachi UV2300)测定<sup>[15]</sup>。

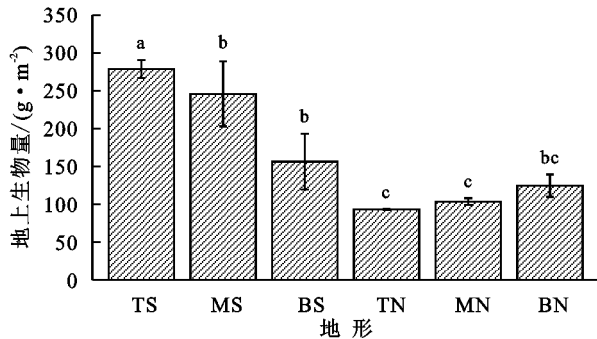
## 1.6 数据分析方法

首先,采用 Excel 2021 对原始数据进行整理,数据统计分析先采用 SPSS 27.0.1 软件的单因素方差分析和 Duncan 多重比较对不同微地形地上生物量和土壤有机碳、全氮、全磷含量及土壤水分含量进行差异性显著性检验的比较分析,显著水平设置为  $p=0.05$ 。如果计算结果中  $p<0.05$ ,说明两组数据存在统计学意义上的显著差异,如果  $p<0.01$ ,说明两组数据存在统计学意义上的差异极显著。用 Pearson 相关分析对地上生物量和土壤因子进行相关性分析。用 Origin 2022b 制作图表。

## 2 结果与分析

### 2.1 地上生物量随地形的变化特征

由图 1 可知,在阳坡,随着坡位的降低地上生物量逐渐减少且有极显著差异;在阴坡,随着坡位的降低地上生物量呈现增加的趋势。在 6 个微地形中 TS 的地上生物量最大为  $278.8 \text{ g/m}^2$ ,TN 地上生物量最小为  $93.4 \text{ g/m}^2$ ,且阴坡的地上生物量整体低于阳坡的地上生物量。



注:同一土层不同小写字母表示微地形之间差异显著( $p<0.05$ )。TS 为阳坡上坡位;MS 为阳坡中坡位;BS 为阳坡下坡位;TN 为阴坡上坡位;MN 为阴坡中坡位;BN 为阴坡下坡位。下同。

图 1 不同微地形的地上生物量

Fig. 1 The aboveground biomass of different microtopography

### 2.2 土壤水分养分随地形的变化特征

由图 2 可以看出,不同样地的土壤有机碳含量受微地形的影响存在一定的差异。在阳坡,0—40 cm 的土层中,土壤有机碳含量由大到小的顺序均为  $TS>MS>BS$ 。在阴坡,0—10 cm 的土层中,土壤有机碳含量随坡位降低而增加;在 10—20 cm 的土层中,MN 最大,TN 最小;20—40 cm 的土层中,MN 最大,BN 最小。对不同土层的有机碳含量进行统计分析可得到:土层深度为 0—10 cm 时,TS 与 BS 以及 TN 与 MN 和 BN 之间差异显著( $p<0.05$ );土层深度为 10—20 cm 时,TS 分别与 BS,TN 和 BN 都差异显著( $p<0.05$ );土层深度为 20—40 cm 时,MN 与

BN 的土壤有机碳含量差异显著( $p<0.05$ ),TS 分别与 BS,TN,BN 都差异显著( $p<0.05$ )。

本研究的结果表明,在阳坡,土壤有机碳含量随坡位降低而减少。在表层 0—20 cm 的土层上,土壤有机碳的含量除上坡外,在阴坡上都大于阳坡,随着土层深度的变化,有机碳含量呈下降趋势。在 3 个深度的土层中,TS 与 BS 之间均有显著性差异。

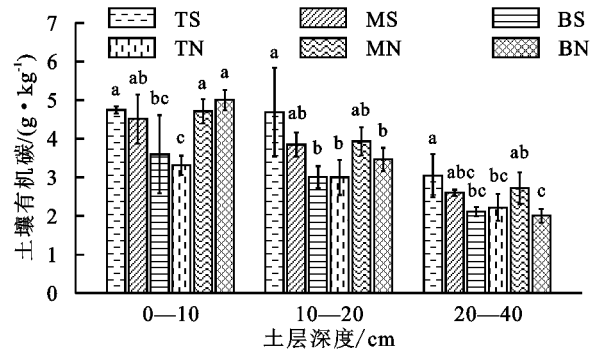


图 2 不同微地形的土壤有机碳含量

Fig. 2 Soil organic carbon content in different microtopography

如图 3 所示,随着微地形发生变化,土壤全氮含量也呈现出了一定程度的差异。在 0—10 cm 的土层中,土壤全氮含量由大到小的排序为:  $TS>BN>MN>MS>BS>TN$ ,由于  $p>0.05$ ,土壤全氮含量无显著差异。在 10—40 cm 土层,全氮含量从大到小的排序为:  $TS>MN>MS>BN>TN>BS$ ,其中 TS 分别与 BS 和 TN 差异显著( $p<0.05$ ),MN 与 BS 差异显著( $p<0.05$ )。本研究的结果表明,在阳坡,3 个土层中土壤全氮含量均随坡位降低而减少。在阴坡,0—10 cm 土层的全氮含量随坡位降低而增加;在其他两个土层全氮含量均随坡位降低先增加后减少,其中均为 MN 含量最高,TN 含量最低。3 个深度的土层中,TS 与 BS 之间均有显著性差异。

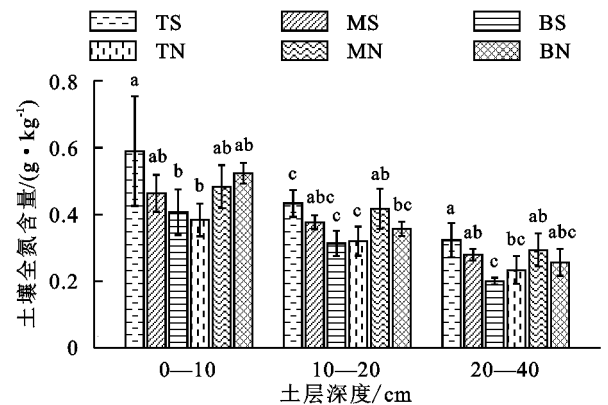


图 3 不同微地形的土壤全氮含量

Fig. 3 Soil total nitrogen content in different microtopography

由图 4 可知,在微地形发生变化的情况下,土壤全磷含量有些许微小的差异。在阳坡,3 个土层的土壤全磷含量均呈现“V”字形变化趋势,在 0—10 cm



及 20—40 cm 土层中,全磷含量随着坡位降低先减小后增大,最终略高于初始值;在 10—20 cm 土层,全磷含量也随坡位的降低先减小后增大,但最终略低于初始值。在阴坡,土壤全磷的含量均随坡位的降低而增大。对土壤全磷含量的统计分析结果如下:在 0—10 cm 的土层中,BN 与 TS,MS,BS,TN 土壤全磷含量差异均显著( $p < 0.05$ )。在 10—20 cm 土层,由于  $p < 0.01$ ,则该土层土壤全磷含量差异极显著。

本研究的结果表明,在阳坡,3 个土层的土壤全磷含量均呈现“V”字形变化趋势;在阴坡,随着坡位的降低土壤全磷的含量均增大。在 10—20 cm 土层土壤全磷含量差异极显著。整体看来,各土层 BN 的土壤全磷含量最大,MS 的全磷含量最小。

由图 5A 可见,6 种不同微地形的平均水分含量的大小顺序为:MS>TS>MN>TN>BN>BS。6 种微地形的平均水分含量均随土层深度的加深而增加,且 MS,MN 和 TS 的土壤水分含量整体波动程度较大。在 0—40 cm 土层,6 种不同微地形的土壤水分含量趋势相似,均随土层加深而增大,且相互之间没有显著差异性

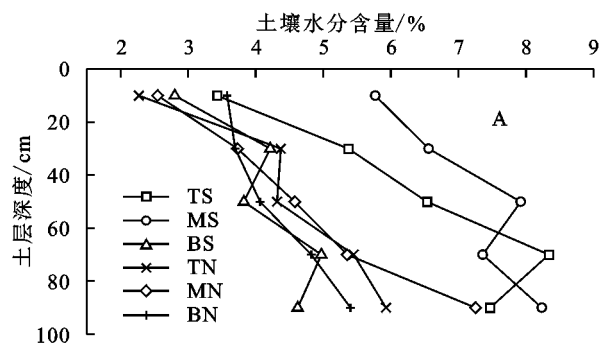


图 5 不同微地形土壤水分含量随土层深度的变化以及不同微地形的土壤水分含量

Fig. 5 Changes of soil moisture content with soil depth in different microtopography and soil moisture content in different microtopography

### 2.3 地上生物量与土壤水分养分的关联变化

由图 6 地上生物量和土壤因子的相关性分析表明,在 0—10 cm 土层,仅有土壤全磷含量与地上生物量显著负相关( $p < 0.05$ ),其他土壤因子与地上生物量之间均未达到显著水平;在 10—20 cm 的土层,除全氮含量与地上生物量之间未达到显著水平外,土壤有机碳及全磷含量均与地上生物量显著相关( $p < 0.05$ ),但有机碳含量与地上生物量呈显著正相关,全磷含量与地上生物量呈显著负相关;在 20—40 cm 土层,土壤有机碳含量与地上生物量显著相关( $p < 0.05$ ),土壤全氮和全磷含量均与地上生物量之间未达到显著水平。以上分析表明仅土壤全氮含量来看,其与地上生物量无显著相关性,表层土壤全磷含量与表层土壤有机碳含量对地上生物量呈显著相关。40—80 cm 土层的土壤含水量

( $p > 0.05$ )(图 5B),说明微地形的变化对土壤表层的水分含量影响不是很大。其中,TN,BS 和 BN 的土壤水分含量在土壤表层(0—40 cm)的波动程度较大,随着深度的增加土壤水分的波动程度逐渐减小并趋于稳定。大于 40 cm 土层,6 种微地形的土壤水分相互之间有显著差异( $p < 0.05$ )(图 5B),且在 80—100 cm 的土层,MS,TS 和 MN 的土壤水分含量显著高于其他 3 个坡位,其中 BS 土壤水分含量最少。

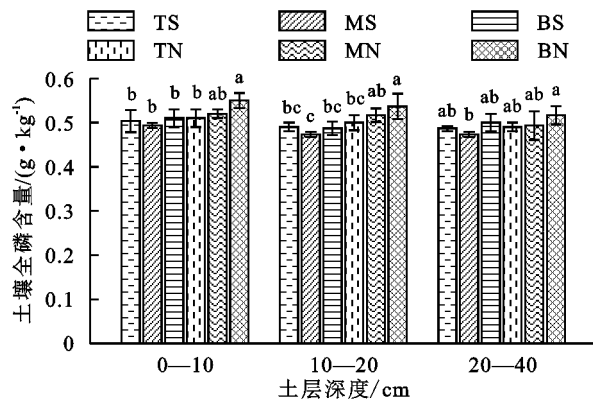
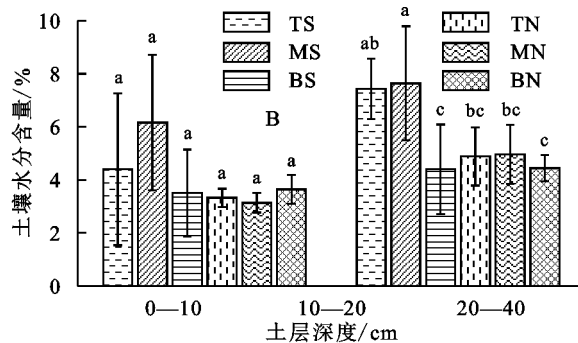


图 4 不同微地形的土壤全磷含量

Fig. 4 Soil total phosphorus content in different microtopography



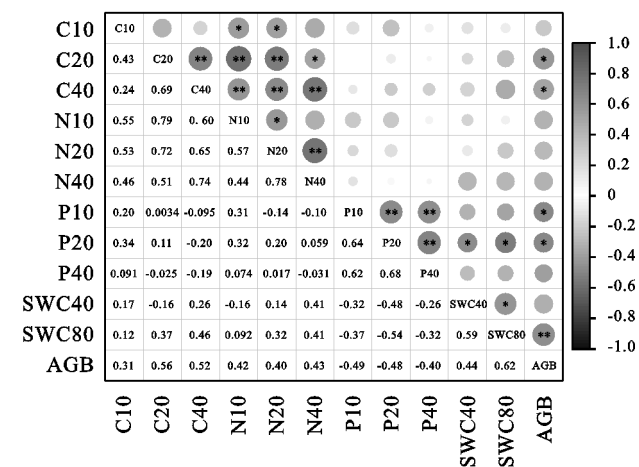
与地上生物量呈极显著相关( $p < 0.05$ )。

一元线性回归分析表明:土壤养分中仅有 10—40 cm 土层的土壤有机碳及 0—20 cm 土层的土壤全磷含量与地上生物量显著相关( $p < 0.05$ ),但回归方程的解释度均不超过 30%(图 7A—D);40—80 cm 土层的土壤水分含量与地上生物量极显著相关( $p < 0.01$ ),回归方程的解释度为 34.8%(图 7E),其余无显著相关的不列出。

对土壤因子与地上生物量进行的多元线性逐步回归分析可知:0—10 cm 土层上的地上生物量的回归模型由土壤全氮和全磷构成,回归关系达到极显著水平( $p < 0.01$ ),对地上生物量变化的解释度为 54.8%,多元回归方程为: $Y = 1072.787 + 478.122STN - 2202.102STP(R^2 = 0.548)$ ;在 10—20 cm 土层上的地上生物量的

回归模型由土壤有机碳和全磷构成,回归关系达到极显著水平( $p<0.01$ ),土壤有机碳和全磷对地上生物量共同拟合的回归方程的解释度为 56.5%,多元回归方程为: $Y=751.967+61.215\text{SOC}-1615.615\text{STP}$  ( $R^2=0.565$ )。将土层分为表层(0—20 cm)和深层(20—40 cm)分析得出,0—20 cm 地上生物量的回归模型由土壤有机碳、全磷和土壤水分含量构成,回归关系达到极显著水平( $p<0.01$ ),对地上生物量变化的解释度为 69.4%,多元回归方程为: $Y=496.207+67.885\text{SOC}-1246.513\text{STP}+13.708\text{SWC}$  ( $R^2=0.694$ )。在 20—40 cm 土层的土壤因子与地上生物量的关系均未达到显著水平( $p>0.05$ )。

该结果表明,在垂直高度的表层土层中土壤有机碳、全氮、全磷含量均对地上生物量有一定的影响,但解释度不高;在加入土壤水分含量的分析中可知,在表层土层中土壤有机碳、全磷和土壤水分含量对地上生物量有较程度的影响;且随着土层的增加,土壤养分及水分对地上生物量的影响越小。



注: \* 表示  $p<0.05$  水平显著; \*\* 表示  $p<0.01$  水平极显著。

图 6 不同土层土壤因子与地上生物量的 Pearson 相关系数  
Fig. 6 Pearson correlation coefficients between soil factors and aboveground biomass in different soil layers

### 3 讨论

(1) 在 6 种不同微地形地上生物量的大小顺序是:  $\text{TS}>\text{MS}>\text{BS}>\text{BN}>\text{MN}>\text{TN}$ , 上坡阳面的生物量最大是由于阳面受太阳光直射, 高海拔梯度的高平均温度和年降雨量维持了高生物量<sup>[16]</sup>; 阳面下坡的坡度较大, 这种地形特点造成深层土壤水分难以滞留, 而土壤水分含量是影响地上生物量波动的重要因素, 与其呈现较强的正相关, 该处土壤水分处于亏缺状态, 不能满足植物生长的需要, 导致地上生物量较低; 上坡阴面的生物量最小是因为径流少, 土层薄, 石砾多, 造成植被生长差。该研究结果与前人的一些研究结果不

一致, 如刘旻霞等<sup>[17]</sup>对甘南高寒草甸的研究表明, 阴坡的地上生物量大于阳坡, 主要是因为阴坡的土壤含水量高, 土壤养分丰富, 导致地上植物个体较大, 地上生物量较高; 华青措<sup>[18]</sup>对青藏高原高寒嵩草草甸的研究得出, 阳坡样地的地上生物量显著低于阴坡, 主要是由于阴坡温度较低, 蒸发较低, 土壤含水量增加, 从而使地上生物量增加。导致本研究结果产生差异的原因可能是该地区阳面的土壤深层水分含量远大于阴面, 而 40 cm 土层以上的根系主要分布层内的水分对地上生物量有较大正向影响<sup>[19]</sup>, 造成生物量在阳面更大, 后期还可以对此进行更深入的研究。

(2) 本研究表明, 不同坡向上土壤有机碳、全氮及全磷含量差异显著, 除上坡外的其他坡位都为阴坡大于阳坡, 主要是因为宏观气候条件较相似、不同坡向受太阳辐射和光照的影响, 土壤表层温度、蒸发量、湿度, 昼夜温差等变化存在差异, 土壤微环境异质性, 导致地表植被组成在阴阳坡之间差异明显, 有机质分解较慢, 致使土壤养分积累也不一致, 且前人<sup>[20]</sup>研究结果显示寒冷的环境更有利于氮的积累, 与本文阴坡氮含量结果一致。在阳坡, 上坡与下坡的土壤有机碳和全氮含量差异显著, 造成该情况的原因可能是因为降雨导致水土流失, 影响了土壤养分在空间上的分布。在不同坡向及坡位上土壤全磷含量差异显著, 但随不同地形的变化不明显, Kanehiro 等<sup>[21]</sup>研究得出在热带雨林中, 沿海拔梯度获得的土壤磷储量没有显著差异, 与本研究结果一致。造成该情况的原因可能是由于该样点海拔较低降水较少, 导致磷的风化作用和运输作用弱。阴坡底部的磷含量显著高于其他位置, 这可能是由于植被覆盖度高、土壤水分含量、有机质含量高, 由于侵蚀、运输和降雨的淋滤作用, 大量的磷从坡面上部迁移到底部。

就 3 个深度的土层来看, 随着土层深度的加深, 土壤有机碳及全氮的含量总体呈下降趋势, 这与刘勇军和熊瑛楠等<sup>[22-23]</sup>的研究结果相似。而土壤全磷含量随土层的加深总体呈现较弱的下降趋势, 变化不明显。导致土壤有机碳、全氮和全磷含量随土层加深而逐渐减少的原因主要有以下几点: 该地区的优势种如铁杆蒿根蘖发达, 在深层土壤中分出较多的细根, 其养分吸收的增加导致了氮和磷浓度的降低<sup>[24]</sup>; 人类的自然活动也会影响直接密切接触到的土壤表层(0—20 cm)的养分含量<sup>[25]</sup>; 同时该地区的地表植物及枯落物丰富, 微生物的分解转化效率高, 地上植物的凋落物分解到表层土壤并提供养分也会导致土壤养分在土壤表面富集, 使得表层土壤养分含量大于深层土壤养分含量。

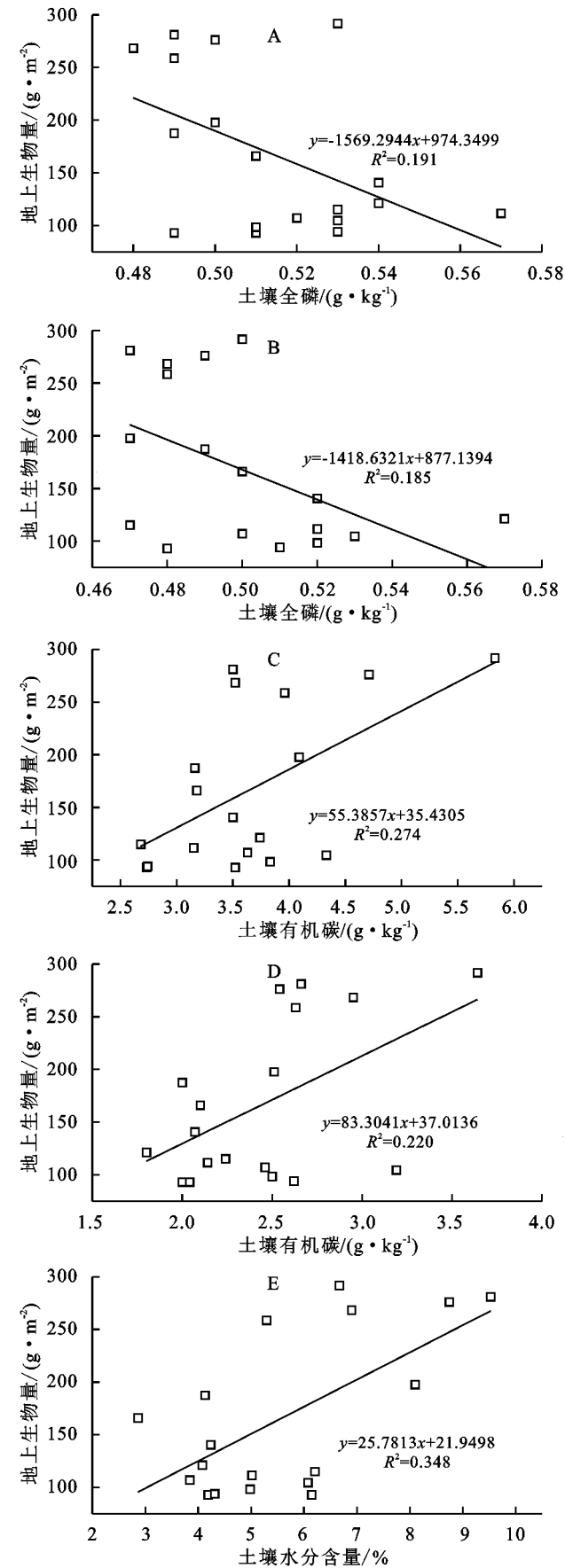


图 7 地上生物量与不同土层土壤养分以及水分的关系  
Fig. 7 Relationship between aboveground biomass and soil nutrient and water contents

(3) 对地上生物量与土壤水分养分进行多元线性回归分析的结果表明,黄土丘陵区草地生态系统的地上生物量与土壤有机碳、全氮、全磷含量及土壤水分含量均存在相关关系,但影响地上生物量的关键土壤因子在不同土层深度有所差异,在 0—10 cm 土层,土壤全氮和全磷含量对地上生物量呈极显著正相关( $p < 0.01$ ),在 10—20 cm 土层,土壤有机碳和全磷含量对地上生物量呈极显著正相关( $p < 0.01$ ),在表层(0—20 cm),土壤有机碳、全磷和土壤水分含量对地上生物量呈极显著正相关( $p < 0.01$ ),在 20—40 cm 土层,土壤因子与地上生物量的关系均未达到显著水平。土壤有机碳、全氮和全磷等土壤因子对黄土丘陵区草地地上生物量变化有一定的解释度,但总体解释度较低,在加入土壤含水量后,对地上生物量的解释度明显增加。说明土壤有机碳、全氮和全磷的共同作用并不是影响地上生物量的主要因素,地上生物量的变化主要受土壤水分含量及土壤有机碳、全磷含量或其他土壤养分的影响。赵景学等<sup>[26]</sup>在对藏北高寒植被地上生物量与土壤因子的研究中得出,土壤有机碳、速效磷对地上生物量的影响最大;王鑫等<sup>[27]</sup>在对高寒草地土壤因子对地上生物量的影响中得出,土壤含水量和速效氮含量是影响地上生物量的主要土壤因子;一般地上生物量越大其剖面土壤含水量越低<sup>[21]</sup>;雷斯越等<sup>[28]</sup>在对吴起县枣庄沟小流域不同坡位植被生物量与土壤养分的研究中得出,土壤有机质含量对地上生物量有一定程度的影响。所以在今后的研究中还要考虑得更加全面。

本文对黄土丘陵区草地生态系统 6 个不同微地形的地上生物量及土壤有机碳、全氮、全磷含量和土壤水分含量的变化以及相互关系进行了研究,研究结果表明微地形对地上生物量及土壤有机碳、全氮、全磷含量和土壤水分含量的分布格局有显著的分配作用,在表层土层中土壤有机碳、全磷和土壤水分含量与地上生物量有显著相关性,对地上生物量有一定程度的影响。该研究为草地生态系统合理的保护管理、生态恢复以及生产力的维持提供了可以借鉴的参考和依据。

### 4 结论

本文以黄土丘陵区草地生态系统为研究对象,通过采集 6 个不同微地形下的草地地上生物量及土壤因子,运用单因素方差分析、Duncan 多重比较以及 Pearson 相关分析等方法,探讨了黄土丘陵区草地地上生物量及土壤水分养分对微地形变化的响应。地上生物量在阳坡不同坡位有极显著差异,在阳面上坡有最大值 278.8 g/m<sup>2</sup>,在阴面上坡有最小值 93.4 g/m<sup>2</sup>。土壤有机碳、全



氮及全磷含量在不同坡向、坡位上均有显著性差异,且均随土层加深呈减小趋势。土壤水分含量在不同微地形梯度均随土层深度的加深呈增加趋势,且在大于40cm土层上,6种微地形的土壤水分含量之间有显著差异。0—20 cm土层的全磷含量与地上生物量呈显著负相关,20—40 cm土层的有机碳含量与地上生物量呈显著正相关,40—80 cm土层的土壤水分含量与地上生物量呈极显著正相关。在垂直高度的表层土层中土壤有机碳、全磷及土壤水分含量的共同作用对地上生物量有一定的影响,解释度为69.4%。

黄土丘陵区草地地上生物量及土壤水分养分均随微地形变化有显著差异,且表层土壤有机碳、全磷含量和土壤水分含量的共同作用对地上生物量有一定的影响。鉴于此,为今后草地生态系统地形复杂地区的生态恢复以及生产力的维持提供了可以借鉴的参考和依据。

#### 参考文献:

- [1] Scurlock J M O, Johnson K, Olson R J. Estimating net primary productivity from grassland biomass dynamics measurements[J]. *Global Change Biol.*, 2002(8):736-753.
- [2] 孙锐,陈少辉,苏红波.2000—2016年黄土高原不同土地覆盖类型植被NDVI时空变化[J].*地理科学进展*, 2019, 38(8):1248-1258.  
Sun R, Chen S H, Su H B. Spatiotemporal variations of NDVI of different land over types on the Loess Plateau from 2000 to 2016[J]. *Progress in Geography*, 2019, 38(8):1248-1258.
- [3] Deák B, Valkó O, Török P, et al. Micro-topographic heterogeneity increases plant diversity in old stages of restored grasslands [J]. *Basic and Applied Ecology*, 2015, 16:291-299.
- [4] 陈颂超.色季拉山土壤表层有机碳空间分布特征及数字制图研究[D].杭州:浙江大学,2016.  
Chen S C. Spatial distribution characterization and digital mapping of soil organic carbon at topsoil in mount Sejila[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2016.
- [5] 赵仪,孙盛楠,严学兵.2010—2020年草地土壤氮循环研究现状与发展趋势[J].*草业科学*, 2021, 38(8):1498-1512.  
Zhao Y, Sun S N, Yan X B. Research status and development trends of soil nitrogen cycle in grasslands during 2010—2020 [J]. *Pratacultural Science*, 2021, 38(8): 1498-1512.
- [6] 潘成忠,上官周平.黄土半干旱区坡地土壤水分、养分及生产力空间变异[J].*应用生态学报*, 2004, 15(11):2061-2066.  
Pan C Z, Shangguan Z P. Spatial variability of soil moisture, nutrients, and productivity on slopeland in loessial semiarid region[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2004, 15(11):2061-2066.
- [7] 冀雯霞,赵峰侠,张瑞,等.晋西北黄土丘陵区土壤和地形因子对草地植被优势种功能性状的影响[J].*生态学杂志*, 2021, 40(3):749-758.  
Ji W X, Zhao F X, Zhang R, et al. Effects of soil and topographic factors on functional traits of dominant plant species in a grassland of loess hilly region, Northwest Shanxi[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2021, 40(3):749-758.
- [8] 汝海丽,张海东,焦峰,等.黄土丘陵区微地形对草地植物群落结构组成和功能特征的影响[J].*应用生态学报*, 2016, 27(1):25-32.  
Rui H L, Zhang H D, Jiao F, et al. Impact of micro-landform on grassland plant community structure and function in the hilly Loess Plateau region[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2016, 27(1):25-32.
- [9] 曾鸿文,温仲明,陶宇,等.延河流域6种草本植物功能性状变异来源分析[J].*水土保持研究*, 2018, 25(5):364-370.  
Zeng H W, Wen Z M, Tao Y, et al. Sources of variation of functional traits of six dominant herbaceous species in Yanhe River basin[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2018, 25(5):364-370.
- [10] 戚德辉,郝咪娜,温仲明.延河流域不同植被区植物叶片碳、氮、磷化学计量特征及其影响因子[J].*江苏农业科学*, 2018, 46(6):224-228.  
Qi D H, Hao M N, Wen Z M. Leaf C, N and P stoichiometric characteristics and their influencing factors in different vegetation zones in the Yanhe River catchment[J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2018, 46(6): 224-228.
- [11] 汝海丽,张海东,焦峰,等.黄土丘陵区微地形梯度下草地群落植物与土壤碳、氮、磷化学计量学特征[J].*自然资源学报*, 2016, 31(10):1752-1763.  
Rui H L, Zhang H D, Jiao F, et al. Plants and soil C, N, P stoichiometric characteristics in relation to micro-topography in the Hilly Loess Plateau Region[J]. *Journal of Natural Resources*, 2016, 31(10):1752-1763.
- [12] 温仲明,焦峰,焦菊英.黄土丘陵区延河流域潜在植被分布预测与制图[J].*应用生态学报*, 2008, 19(9):1897-1904.  
Wen Z M, Jiao F, Jiao J Y. Prediction and mapping of potential vegetation distribution in Yanhe River catchment in hilly area of Loess Plateau[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2008, 19(9):1897-1904.
- [13] 郝冠军,黄懿珍,赵晓艺,等.重铬酸钾外加热法测定土壤有机质的不确定度评定[J].*上海农业学报*, 2011, 27(3):103-109.  
Hao G J, Huang Y Z, Zhao X Y, et al. Evaluation of uncertainty in determining soil organic matter by potassium dichromate heating method[J]. *Acta Agricul-*



- ture Shanghai, 2011, 27(3):103-109.
- [14] 汪欣, 向兆, 李策, 等. 全自动凯氏定氮仪测定土壤全氮含量方法的优化探索[J]. 山东农业大学学报: 自然科学版, 2020, 51(3):438-440, 446.
- Wang X, Xiang Z, Li C, et al. Optimization of the Method for Determination of Total Nitrogen in Soil by Automatic Kjeldahl Apparatus[J]. Journal of Shandong Agricultural University (Natural Science Edition), 2020, 51(3):438-440, 446.
- [15] 靳彩霞. 提高土壤有效磷测定数据准确性的途径[J]. 甘肃农业科技, 2011(11):62-63.
- Jin C X. Ways to improve the accuracy of soil available phosphorus measurement data[J]. Gansu Agricultural Science and Technology, 2011(11):62-63.
- [16] Tsozue D, Nghonda J P, Tematio P, et al. Changes in soil properties and soil organic carbon stocks along an elevation gradient at Mount Bambouto, Central Africa[J]. Catena, 2019, 175:251-262.
- [17] 刘旻霞, 王刚, 盛红梅. 高寒草甸阳坡—阴坡梯度上环境因子特征及其与地上生物量和物种丰富度的关系[J]. 兰州大学学报: 自然科学版, 2013, 49(1):76-81.
- Liu M X, Wang G, Sheng H M. Environmental factors characteristic of sunny and shady slope gradients in relation to above-ground biomass and species richness in an alpine meadow[J]. Journal of Lanzhou University: Natural Sciences, 2013, 49(1):76-81.
- [18] 华青措. 阳坡—阴坡高寒嵩草草甸地上生物量、多样性及土壤因子变化[J]. 草学, 2017(4):22-25.
- Hua Q C. Changes of live-top biomass, plant diversity and soil factors at sunny and shady slope on Alpine Kobresia Meadow[J]. Journal of Grassland and Forage Science, 2017(4):22-25.
- [19] 黄德青, 于兰, 张耀生, 等. 祁连山北坡天然草地地上生物量及其与土壤水分关系的比较研究[J]. 草业学报, 2011, 20(3):20-27.
- Huang D Q, Yu L, Zhang Y S, et al. Above-ground biomass and its relationship to soil moisture of natural grassland in the northern slopes of the Qilian Mountains[J]. Acta Prataculturae Sinica, 2011, 20(3):20-27.
- [20] 王琳, 欧阳华, 周才平, 等. 贡嘎山东坡土壤有机质及氮素分布特征[J]. 地理学报, 2004, 59(6):1012-1019.
- Wang L, Ouyang H, Zhou C P, et al. Distribution characteristics of soil organic matter and nitrogen on the east slope of Gongga Mountain[J]. Acta Geographica Sinica, 2004, 59(6):1012-1019.
- [21] Kitayama K, Aiba S I. Ecosystem structure and productivity of tropical rain forests along altitudinal gradients with contrasting soil phosphorus pools on Mount Kinabalu, Borneo[J]. Journal Ecology, 2002, 90(1):37-51.
- [22] 刘勇军, 彭曙光, 肖艳松, 等. 湖南烟稻轮作区土壤团聚体稳定性及其与碳氮比的关系[J]. 中国烟草学报, 2020, 26(1):75-83.
- Liu Y J, Peng S G, Xiao Y S, et al. Stability of soil aggregate and its relationship with carbon nitrogen ratio in rice-tobacco rotation areas in Hunan province[J]. Acta Tabacaria Sinica, 2020, 26(1):75-83.
- [23] 熊瑛楠, 冯天骄, 王平, 等. 晋西黄土区长期人工林恢复对土壤水分和养分性质的影响[J]. 水土保持学报, 2022, 36(2):228-237, 246.
- Xiong Y N, Feng T J, Wang P, et al. Effects of long-term artificial forest restoration on soil moisture and nutrient characteristics in the Loess area of western Shanxi province[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2022, 36(2):228-237, 246..
- [24] Su H X, Sang W G, Wang Y X, et al. Simulating *Picea schrenkiana* forest productivity under climatic changes and atmospheric CO<sub>2</sub> increase in Tianshan Mountains, Xinjiang Autonomous Region, China[J]. Forest Ecology & Management, 2007, 246(2):273-284.
- [25] 谢柠杲, 王棋, 李冰, 等. 坡度和坡位对植烟坡地紫色土有机碳氮变化的影响[J]. 长江流域资源与环境, 2021, 30(9):2245-2252.
- Xie N X, Wang Q, Li B, et al. Effects of gradients and positions on organic carbon and nitrogen of purple soil on Tobacco planting slope[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2021, 30(9):2245-2252.
- [26] 赵景学, 陈晓鹏, 曲广鹏, 等. 藏北高寒植被地上生物量与土壤环境因子的关系[J]. 中国草地学报, 2011, 33(1):59-64.
- Zhao J X, Chen X P, Qu G P, et al. Relationships between aboveground biomass and soil factors in Alpine grassland in north Tibet[J]. Chinese Journal of Grassland, 2011, 33(1):59-64.
- [27] 王鑫, 胡玉昆, 等. 高寒草地主要类型土壤因子特征及对地上生物量的影响[J]. 干旱区资源与环境, 2008, 22(3):196-200.
- Wang X, Hu Y K, et al. The character of soil factors of the main community in high and cold grasslands and influence on ground biomass[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2008, 22(3):196-200.
- [28] 雷斯越, 赵文慧, 杨亚辉, 等. 不同坡位植被生长状况与土壤养分空间分布特征[J]. 水土保持研究, 2019, 26(1):86-91, 105.
- Lei S Y, Zhao W H, Yang Y H, et al. Spatial distribution characteristics of soil nutrients and vegetation growth status in different slopes[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2019, 26(1):86-91, 105.