

DOI: 10.20103/j.stxb.202309031898

杜芳芳,童根平,何影,王旭池,叶正钱,吴家森,傅伟军.不同年限梅花鹿干扰对亚热带森林土壤和植物生物量的影响.生态学报, 2024, 44(17): 7786-7796.

Du F F, Tong G P, He Y, Wang X C, Ye Z Q, Wu J S, Fu W J. Effects of different *Cervus nippon* disturbing years on soil and plant biomass in a subtropical forest. Acta Ecologica Sinica, 2024, 44(17): 7786-7796.

# 不同年限梅花鹿干扰对亚热带森林土壤和植物生物量的影响

杜芳芳<sup>1</sup>,童根平<sup>2</sup>,何影<sup>1</sup>,王旭池<sup>2</sup>,叶正钱<sup>1</sup>,吴家森<sup>1</sup>,傅伟军<sup>1,\*</sup>

1 浙江农林大学环境与资源学院,杭州 311300

2 浙江清凉峰国家级自然保护区管理局,临安 311321

**摘要:**有蹄类动物的采食、践踏、排泄等行为会影响森林土壤理化特性与植物群落特征。选取浙江清凉峰国家级自然保护区典型亚热带针阔混交林地,设置 4 个华南梅花鹿干扰处理(禁养,圈养 10、15、20 a),以探讨华南梅花鹿圈养对亚热带林地土壤和植被功能的影响。结果表明:(1)随着华南梅花鹿圈养年限的增加,土壤 pH、含水率、毛管孔隙度、有机质和阳离子交换量呈现降低的趋势,土壤容重、碱解氮、有效磷和速效钾呈现升高的趋势。(2)华南梅花鹿圈养对 0—40 cm 土层土壤容重、含水率、毛管孔隙度、有机质、阳离子交换量以及 0—20 cm 土层碱解氮和有效磷的影响显著,均为圈养 20 a 处理与对照处理之间差异性达到显著水平( $P<0.05$ )。(3)华南梅花鹿干扰能显著降低林下植被的地上生物量( $P<0.05$ )。研究结果揭示亚热带森林土壤-植被对梅花鹿干扰的响应特征,为探讨森林蹄类动物栖息地退化机制和优化区域生态恢复模式提供科学的数据与理论基础。

**关键词:**华南梅花鹿;圈养年限;土壤理化性质;地上生物量;亚热带针阔混交林

## Effects of different *Cervus nippon* disturbing years on soil and plant biomass in a subtropical forest

DU Fangfang<sup>1</sup>, TONG Genping<sup>2</sup>, HE Ying<sup>1</sup>, WANG Xuchi<sup>2</sup>, YE Zhengqian<sup>1</sup>, WU Jiasen<sup>1</sup>, FU Weijun<sup>1,\*</sup>

1 College of Environmental and Resource Sciences, Zhejiang Agriculture & Forestry University, Hangzhou 311300, China

2 Management Office, Qingliangfeng National Nature Reserve of Zhejiang, Lin'an 311321, China

**Abstract:** The soil physicochemical properties and the characteristics of plant community in forest were affected by the behaviors of ungulates such as feeding, trampling and excreting. In this study, we selected a typical coniferous mixed with broad-leaved forest in Qingliangfeng National Nature Reserve of Zhejiang as our research area. We set up four treatments related to *Cervus nippon kopschi* disturbance (no captivity; 10 a captivity, 15 a captivity and 20 a captivity) to explore their effects on soil properties and plant growth. The results indicated that (1) the values of soil pH, soil water content (SWC), soil capillary porosity (SCP), soil organic matter (SOM) and cation exchange capacity (CEC) tended to decrease with the rise of the captivity years of *Cervus nippon kopschi*. On the other hand, the contents of bulk density (BD), available nitrogen (AN), available phosphorus (AP) and available potassium (AK) tended to increase with the rise of the captivity years of *Cervus nippon kopschi*. (2) The soil physicochemical properties parameters (AN and AP of 0—20 cm soil layer, 0—40 cm soil layer; BD, SWC, CP, SOM, CEC) between the treatment with 20 a captivity and the control plots showed significant differences ( $P<0.05$ ). (3) Captivity of *Cervus nippon kopschi* also significantly reduced the aboveground biomass of plants

基金项目:浙江省自然科学基金项目(LY20C160004)

收稿日期:2023-09-03; 网络出版日期:2024-06-26

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: fuweijun@zafu.edu.cn

( $P < 0.05$ ). This study reveals the response characteristics of soil physiochemical properties and plant aboveground biomass to captive *Cervus nippon kopschi* in a typical subtropical forest. This study could provide scientific bases of data and theory for exploring the degradation mechanism of ungulates habitat in forest and improving the regional ecological restoration.

**Key Words:** *Cervus nippon kopschi*; captive years; soil physiochemical properties; aboveground biomass of plants; subtropical coniferous and broad-leaved mixed forest

森林保护区是为保护森林特有物种或特有生态系统而划定的自然区域<sup>[1]</sup>,其土壤资源与环境对动植物健康状况和生态功能的发挥至关重要<sup>[2-3]</sup>。自然资源和生态环境的脆弱性与动物活动过程中引起的资源及环境破坏是不可忽略的问题。大型蹄类动物通过觅食、践踏、排泄等行为影响林地的土壤理化性质与植物生长,破坏森林生态系统,甚至可能毁灭动植物赖以生存的生境<sup>[4-5]</sup>。迄今,国内外专家学者就蹄类动物干扰对其生境的影响作了大量研究。其中,国内研究主要集中在不同家畜放牧强度对草地土壤理化性质影响方面<sup>[6-8]</sup>,国外在土壤与植被对禁养鹿群后响应情况的研究报告较多,且多集中在温带地区<sup>[9-11]</sup>。而针对亚热带森林中野生蹄类动物圈养对土壤理化性质及植被生物量影响的研究却鲜见报道。

梅花鹿(*Cervus nippon*)隶属哺乳纲偶蹄目鹿科鹿属,在我国分布较广泛,目前中国境内主要分布有华南梅花鹿亚种、梅花鹿东北亚种、梅花鹿四川亚种和梅花鹿台湾亚种四个物种。浙江省清凉峰国家级自然保护区内的华南梅花鹿为国家 I 级重点保护野生动物。自保护区成立后,清凉峰梅花鹿种群数量由 80 头左右增长到 200—300 头。然而作为一种群居性、草食性蹄类动物,梅花鹿对其栖息地具有很大的破坏性。随着梅花鹿群频繁活动的干扰,保护区内土壤破碎、水土流失、地表裸露等现象愈演愈烈,不利于整个动物-植物-土壤生态系统的可持续平衡发展。

本论文对不同梅花鹿圈养年限下土壤理化性质和植被地上生物量的特征进行研究,旨在揭示保护区土壤-植被对梅花鹿干扰的响应特征,为探讨森林蹄类动物栖息地退化机制和优化区域生态恢复模式提供科学的数据与理论基础。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

清凉峰自然保护区位于浙江省临安区内,地理位置为 118°50'57"—119°13'23"E,30°00'42"—30°19'33"N,总面积为 11252 hm<sup>2</sup>。保护区气候属于中亚热带季风气候,年均气温 12.5 ℃,年降水量 1862.2—2331.9 mm 之间,境内海拔高差悬殊,蕴藏着丰富的植物资源。本文研究区为清凉峰保护区的千顷塘区域,区域面积 5690 hm<sup>2</sup>,土壤主要为棕黄壤,林分类型主要为针阔混交林,是野生华南梅花鹿(*Cervus nippon kopschi*)分布的重点区域,为梅花鹿提供适宜的栖息地以及丰富的水源(高山湖泊)、食物来源。保护区内华南梅花鹿可食植物近 200 种,草木丰盛时期的食物选择主要有:沙参(*Adenophora stricta*)、扇脉杓兰(*Cypripedium japonicum*)、小果菝葜(*Smilax davidiana*)、桔梗(*Platycodon grandiflorus*)、牯岭藜芦(*Veratrum schindleri*)、驴蹄草(*Caltha palustris*)。食物匮乏季节的食物补充主要有:中国绣球(*Hydrangea chinensis*)、高山芒(*Miscanthus sinensis*)、山胡椒(*Lindera glauca*)、浆果楝(*Cipadessa baccifera*),以及人工投喂的玉米和麦麸料。经野外观察与记录发现,区内成年鹿每天觅食 6 h 左右,摄入的植物嫩茎叶超过 10 kg,并通过啃食土壤、盐肤木补充盐分。因此随着梅花鹿经年累月的采食、践踏,研究区内生态环境问题日益恶化。

### 1.2 试验方法

在千顷塘保护站后山选取具有代表性、均匀度一致的针阔混交林试验样地,样地中心海拔约 1160 m。在 2003 年、2008 年、2013 年分别使用围栏在该样地进行梅花鹿圈养区建设,共扩建为 3 个梅花鹿圈养区域,相应设置为圈养 10、15、20 a 的 3 个圈养样地(图 1),总面积 12 hm<sup>2</sup>,各圈养区之间有门可供梅花鹿自由通行。

作为群居动物,除圈养年限以外,鹿口的密度、取食量等可保证相对一致。圈养年限长短可用于表征干扰强度大小,并且相同干扰年限下干扰强度一致。另外在围栏外邻近区域(不受梅花鹿干扰)设置对照样地 1 个。

于 2022 年 12 月底在每个样地内根据不同方位随机选取 6 个  $1\text{ m}\times 1\text{ m}$  样方,剔除样方内枯枝落叶等杂物,调查并记录每个样方内林下植被地上生物量,采集各样点 0—20 cm、20—40 cm、40—60 cm 土层土样(由混合样经四分法取得)及原状土(环刀),装入塑封袋中,运回实验室,土样经自然风干、去除杂物、磨碎、过筛后用于测定相关土壤性质。

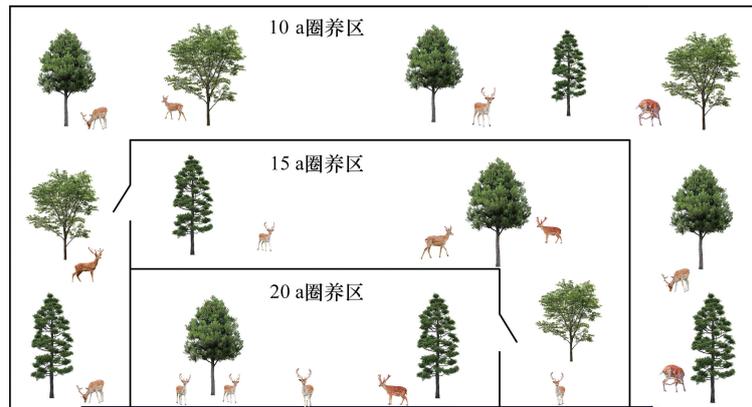


图 1 研究样地位置示意图

Fig.1 Location of research sample plots

**梅花鹿圈养:**本研究中的梅花鹿在大面积的人工围栏内生活,只在缺乏自然食物时才投喂饲料,趋向于森林野生动物自由生活的模式,异于常规的畜禽圈养(在小区域内全年定点定时饲养),也不同于将动物在圈外饲养的放养(包含散养)模式。

### 1.3 样品测定分析

土壤 pH 采用 pH 计测定、容重和毛管孔隙度采用环刀-浸泡法测定、含水率使用烘干法测定、碱解氮用碱解扩散法测定、有效磷用碳酸氢钠浸提-钼锑抗分光光度法测定、速效钾用乙酸铵浸提-火焰光度计法测定、有机质采用重铬酸钾氧化-外加热法测定、阳离子交换量(CEC)用乙酸铵交换法测定<sup>[12]</sup>。

### 1.4 数据处理

运用 SPSS 20.0 进行各指标的统计分析,使用 K-S 法检验数据正态性;双因素方差分析用于检验圈养年限与土层深度对土壤理化指标的影响;采用单因素方差分析及 Duncan 法进行指标间的差异比较,显著性水平均设置为 0.05。采用 R 软件进行相关分析,其余图件均由 Origin 2021 绘制。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同圈养年限下土壤物理性质的变化

土壤容重、含水率和毛管孔隙度分别与土壤深度及圈养年限呈显著相关性,而对土壤深度和圈养年限的交互效应均无显著响应(表 1)。土壤容重在各土层均表现为随着圈养年限的增加而增大的趋势,其大小为禁养<圈养 10 a<圈养 15 a<圈养 20 a(图 2)。在 0—20、20—40 cm 深度时各圈养处理间表现出显著差异,其中圈养 20 a 后的土壤容重在任意土壤深度均显著高于禁养( $P<0.05$ )。随着圈养年限的增加,土壤含水率和毛管孔隙度分别在各土壤深度均呈现降低的趋势,大小均为禁养>圈养 10 a>圈养 15 a>圈养 20 a。总体上,圈养 20 a 后的土壤含水率及毛管孔隙度在任意土壤深度均显著低于禁养( $P<0.05$ )。在 40—60 cm 深度时各圈养处理间的土壤容重、含水率和毛管孔隙度均无显著差异( $P>0.05$ )。

表 1 土壤理化性质对土壤深度和圈养年限的响应

Table 1 The differences in soil physicochemical properties among soil depth and captive years

指标 Index	名称 Name			
	土壤深度 Soil depth (SD)	圈养年限 Captive years (CY)	SD×CY	
土壤容重	F	20.46	13.27	0.90
Soil bulk density	P	<0.001	<0.001	0.51
土壤含水率	F	10.07	9.48	0.44
Soil water content	P	<0.001	<0.001	0.85
土壤毛管孔隙度	F	7.19	16.37	1.20
Soil capillary pore	P	<0.001	<0.001	0.32
土壤 pH	F	3.33	3.22	0.32
Soil pH	P	0.04	0.03	0.93
土壤有机质	F	34.44	127.41	1.94
Soil organic matter	P	<0.001	<0.001	0.09
土壤阳离子交换量	F	4.12	5.31	0.84
Soil cation exchange capacity	P	0.02	<0.001	0.54
土壤碱解氮	F	71.13	7.15	0.54
Soil available nitrogen	P	<0.001	<0.001	0.77
土壤有效磷	F	4.97	10.93	2.18
Soil available phosphorus	P	0.01	<0.001	0.06
土壤速效钾	F	41.37	5.21	2.19
Soil available potassium	P	<0.001	<0.001	0.06

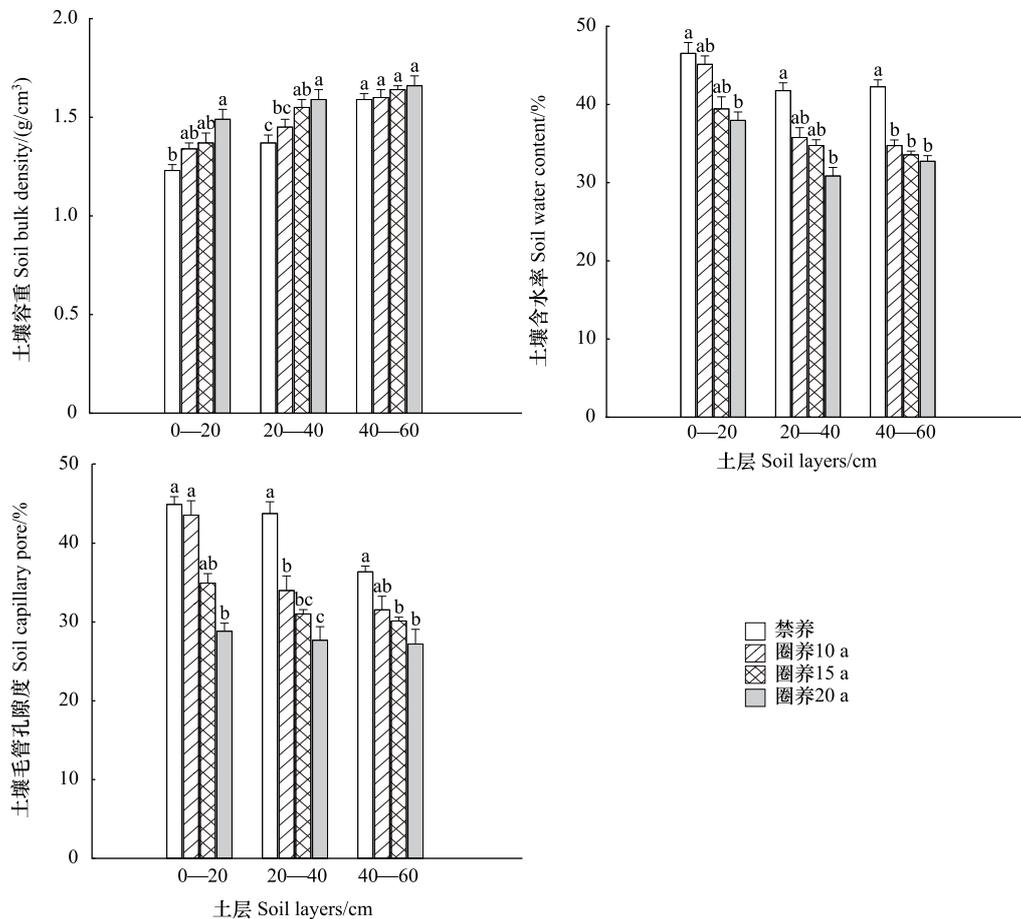


图 2 不同圈养年限下土壤容重、含水率及毛管孔隙的剖面特征

Fig.2 Soil bulk density, water content and capillary pore under different years of captive plots

图中误差线表示标准误差,不同小写字母表示同土层的不同圈养年限下差异显著 ( $P < 0.05$ )

## 2.2 不同圈养年限下土壤化学性质的变化

### 2.2.1 不同圈养年限下土壤 pH、阳离子交换量、有机质的变化

土壤 pH 值、阳离子交换量和有机质均受圈养年限与土壤深度的影响,而不受圈养年限和土壤深度交互效应的影响(表 1)。如图 3 所示,随圈养年限的增加,土壤 pH 在任意土层表现先增加后降低的变化趋势,在 0—20 cm 和 40—60 cm 土层的大小为圈养 20 a<禁养<圈养 15 a<圈养 10 a,在 20—40 cm 土层的大小为圈养 20 a<圈养 15 a<禁养<圈养 10 a。所有圈养处理(10、15、20 a)的土壤 pH 值在任意土壤深度均与禁养处理无显著差异( $P>0.05$ ),除 40—60 cm 土层圈养 20 a 显著低于圈养 10 a 外( $P<0.05$ ),各圈养处理间在各土壤深度均无显著差异( $P>0.05$ )。土壤有机质在不同深度下均随着圈养年限的增加呈下降趋势,其大小为圈养 20 a<圈养 15 a<圈养 10 a<禁养。所有圈养处理下土壤有机质在任意土壤深度均显著低于禁养处理( $P<0.05$ ),且各处理间在任意土层的变化幅度相似。除 40—60 cm 土层外,圈养 10 a 与圈养 15 a 和 20 a 的土壤有机质在任意土层均存在显著差异( $P<0.05$ )。土壤阳离子交换量在 0—20 cm 和 40—60 cm 土层均随着圈养年限的增加呈下降趋势,其大小为圈养 20 a<圈养 15 a<圈养 10 a<禁养。而在 20—40 cm 随着圈养年限的增加表现为先降低后升高再降低的趋势,大小为圈养 20 a<圈养 10 a<圈养 15 a<禁养。所有圈养处理在任意土壤深度均显著低于禁养处理( $P<0.05$ ),而各圈养处理间均无显著差异( $P<0.05$ )。

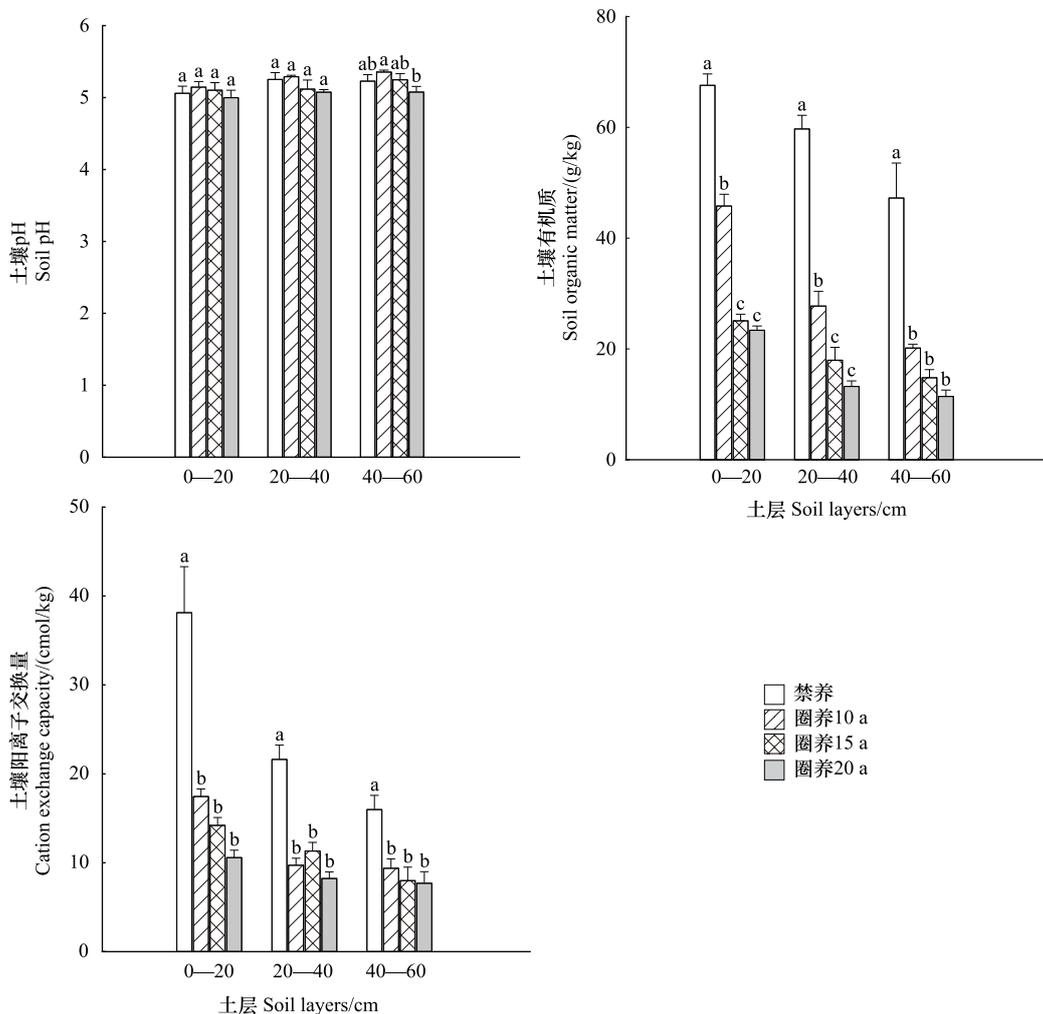


图 3 不同圈养年限下土壤 pH、有机质及阳离子交换量的剖面特征

Fig.3 Soil pH, SOM and CEC under different years of captivity in plots

图中误差线表示标准误差,不同小写字母表示同土层不同圈养年限下差异显著( $P<0.05$ )

### 2.2.2 不同圈养年限下土壤碱解氮、有效磷、速效钾的变化

土壤碱解氮、有效磷和速效钾均受圈养年限与土壤深度的影响,而不受圈养年限和土壤深度交互效应的影响(表 1)。如图 4 所示,在不同圈养年限下,土壤碱解氮仅在 0—20 cm 土层呈显著差异,在其余土层并无显著差异,但仍存在一定变化趋势。随着圈养年限的增加,土壤碱解氮在任意土层均呈现先增加后下降再增加的趋势。土壤碱解氮在 0—20 cm 和 20—40 cm 土层的大小为禁养<圈养 15 a<圈养 10 a<圈养 20 a,在 40—60 cm 土层的大小为禁养<圈养 15 a<圈养 20 a<圈养 10 a。且土壤碱解氮除 0—20 cm 土层,圈养 10 a 和 20 a 显著高于禁养以及圈养 20 a 显著高于圈养 15 a 外( $P<0.05$ ),各处理在各土壤深度均无显著差异( $P>0.05$ )。

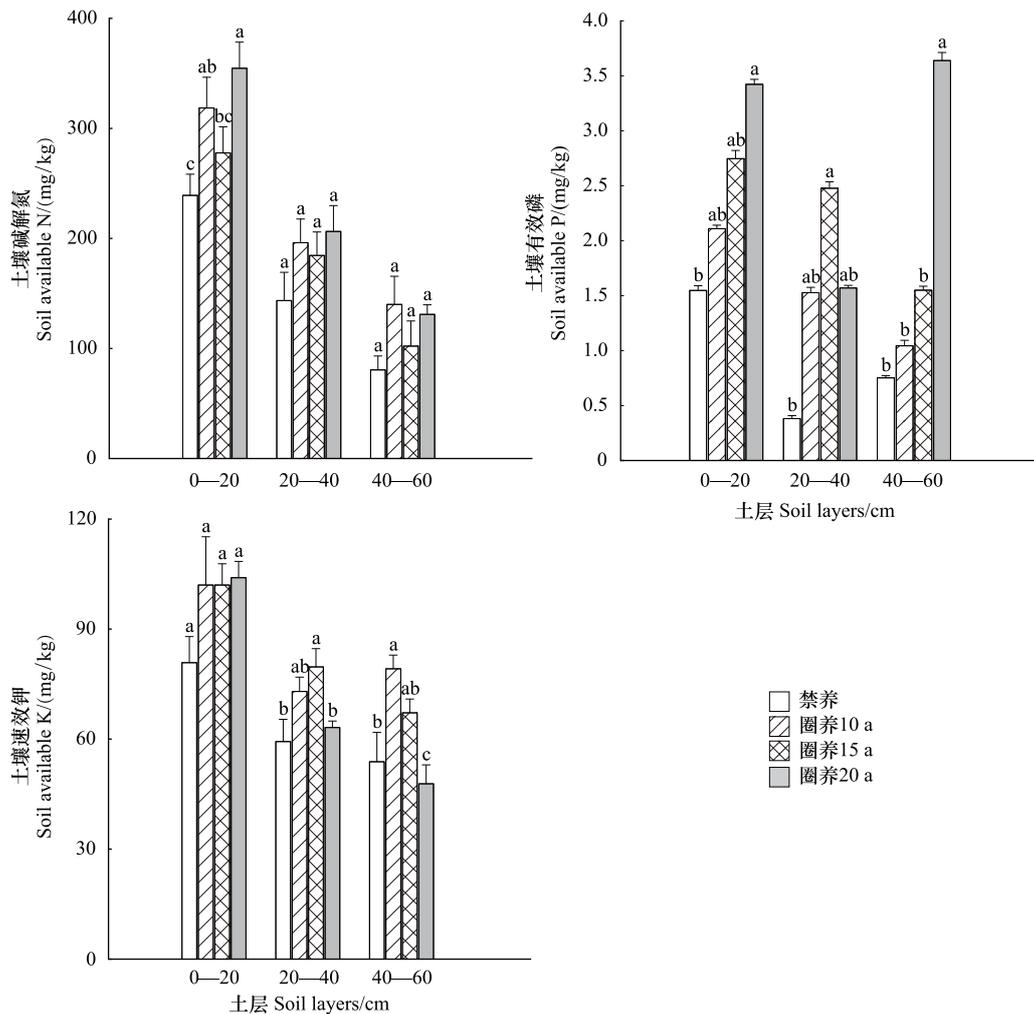


图 4 不同圈养年限下土壤碱解氮、有效磷及速效钾的剖面特征

Fig.4 Soil AN, AP and AK under different years of captivity in plots

图中误差线表示标准误差,不同小写字母表示同土层不同圈养年限下差异显著 ( $P<0.05$ )

土壤有效磷在 0—20 cm 和 40—60 cm 土层呈现随圈养年限的增加而增加的趋势,大小均为禁养<圈养 10 a<圈养 15 a<圈养 20 a(图 4)。而在 20—40 cm 深度表现出随圈养年限的增加先增加后降低的趋势,大小为禁养<圈养 10 a<圈养 20 a<圈养 15 a。在 0—20 cm 时圈养 20 a 显著高于禁养( $P<0.05$ ),在 20—40 cm 时圈养 15 a 显著高于禁养( $P<0.05$ ),在 40—60 cm 时圈养 20 a 显著高于禁养、圈养 10 a 和 15 a( $P<0.05$ )。

土壤速效钾在 0—20 cm 深度呈现随圈养年限的增加而增加的趋势,大小为禁养<圈养 10 a<圈养 15 a<圈养 20 a(图 4),而在 20—40 cm 和 40—60 cm 深度表现出随圈养年限的增加先增加后降低的趋势,大小分别为禁养<圈养 20 a<圈养 10 a<圈养 15 a、圈养 20 a<禁养<圈养 15 a<圈养 10 a。土壤速效钾在 20—40 cm 土层圈

养 15 a 显著高于禁养和圈养 20 a ( $P < 0.05$ ), 在 40—60 cm 土层圈养 10 a 显著高于禁养和圈养 20 a ( $P < 0.05$ ), 而在 0—20 cm 土层各处理间均无显著差异 ( $P > 0.05$ )。

### 2.3 不同圈养年限下植物地上生物量的变化

植物地上生物量随着圈养年限的增加而降低(图 5), 其中禁养显著高于各圈养处理 ( $P < 0.05$ ), 圈养 10 a 显著高于圈养 15 a 和 20 a ( $P < 0.05$ ), 而圈养 15 a 和 20 a 无显著差异 ( $P > 0.05$ )。

## 3 讨论

### 3.1 土壤物理性质对梅花鹿干扰的响应

土壤容重反映土壤透气透水以及保水能力的高低, 主要受土壤有机质、土壤质地及踩踏程度的影响, 是反应土壤紧实度的重要指标<sup>[13]</sup>。多数研究发现随着动物干扰强度的增加, 土壤的紧实度会增大, 容重逐渐增加<sup>[14—15]</sup>。本研究发现土壤容重在各土层均表现为随着圈养年限的增加而增大的趋势, 并且与有机质含量显著负相关(图 6), 这与以往研究结果一致, 由于在黏质土壤中, 土壤团粒结构较多, 随着梅花鹿踩压强度增大, 土壤结构遭受破坏, 同时草地生产力下降、土壤有机质来源减少而分解速度加快, 使得土壤容重增大。本研究中, 不同梅花鹿圈养条件下 40—60 cm 土层土壤容重无显著变化, 可能深层土壤容重对动物干扰的响应存在一定的滞后效应。总体上, 梅花鹿圈养 20 a 后的各土层土壤容重最大, 而土壤容重过大易造成该区域土壤退化。

土壤水分是土壤物质、能量交换的基本条件, 是植被生长繁殖的主要限制因子<sup>[16]</sup>。土壤含水率受到多方面因素的影响, 其中大型动物长期干扰是影响土壤水分的重要因素之一<sup>[17—18]</sup>。本研究发现随着圈养年限的增加, 各土层土壤含水率均呈现下降的趋势, 并在圈养 20 a 条件下均显著低于禁养。可能在圈养条件下, 一方面动物踩踏、舔食土壤(梅花鹿补充盐分的途径之一)使得地面凹凸不平、硬度增大<sup>[19]</sup>, 土壤孔隙减少, 土壤的渗透阻力加大, 同时水分蒸发快, 引起土壤保水和持水能力下降<sup>[20]</sup>。另一方面, 还可能与动物对植被的破坏度增大后导致植物涵养水源能力降低有关<sup>[18]</sup>。研究表明植物在生长过程中可以通过凋落物以及地下植物根系对土壤的持水能力起到反馈作用<sup>[21]</sup>。而植物群落与土壤微生物群落之间存在一定的反馈关系<sup>[22]</sup>, 其中土壤微生物能够改善植物种间关系和群落动态, 而土壤含水率的降低可能在一定程度上影响这种反馈关系, 使得植物群落表现出较差的生长发育和繁殖状态, 反而降低植被涵养水源能力。

土壤毛管孔隙度对土壤的入渗性和持水能力具有重要作用, 可以作为评价土壤质量的数量指标之一<sup>[23]</sup>。土壤容重会对土壤的孔隙结构及蓄水能力产生影响<sup>[24]</sup>, 以往研究发现随着随机干扰强度的增加, 土壤容重和毛管孔隙度、含水率呈现出显著的负相关性, 并且毛管孔隙度与土壤含水率空间分布具有一致性<sup>[14, 25—26]</sup>。本试验发现, 在梅花鹿圈养条件下, 土壤毛管孔隙度与土壤含水率变化较为一致, 而与土壤容重变化相反, 且相关分析显示了三个指标之间两两显著相关的结果(图 6), 这与前人研究结果一致, 主要是随机干扰引起土壤结构破坏力度大, 土壤紧实度增加, 降雨后土壤易板结, 植物根系对土壤的穿插及稳固作用减弱, 导致土壤毛管孔隙度降低。

### 3.2 土壤化学性质对梅花鹿干扰的响应

对于土壤 pH, 本研究中所有圈养处理在任意土壤深度均与禁养处理无显著差异。但随圈养年限的增加,

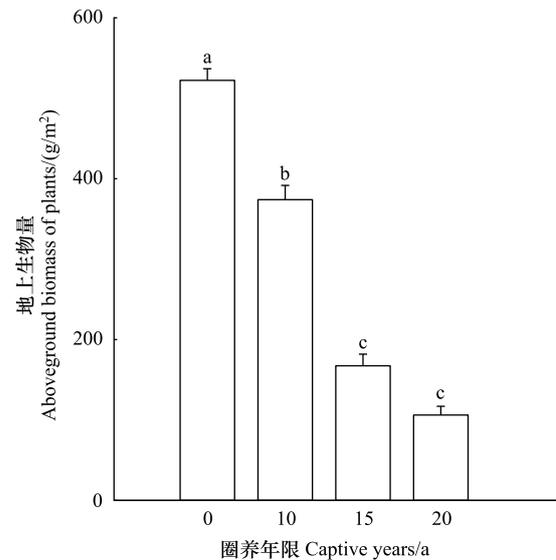


图 5 不同圈养年限下植物地上生物量的变化

Fig.5 The aboveground biomass under different years of captivity in plots

图中误差线表示标准误差, 柱子不同小写字母表示不同圈养年限下差异显著 ( $P < 0.05$ )

土壤 pH 呈逐渐下降趋势。这与 Dodge 等研究结果一致<sup>[27]</sup>,可能原因是一方面梅花鹿的选择性觅食可能会减少碱性或中性凋落物到达土壤的数量,相对来说更多的酸性凋落物在土壤中积累,本研究也发现研究区内梅花鹿的过度啃食已导致碱性盐肤木凋落物对土壤的归还量极少。另一方面,梅花鹿还可能通过代谢废物的沉积改变土壤 pH,在降雨后尿素迅速水解成氰酸铵,铵转化为氨会导致土壤中 H<sup>+</sup>的释放,氨从土壤表面挥发后土壤 pH 降低。此外,由于研究区梅花鹿频繁啃食土壤补充盐分也可能导致可溶性盐类含量减少,从而引起 pH 值降低。pH 的降低反过来会通过影响铁和锰等营养物质可用性而间接影响植物的生长<sup>[28]</sup>。

土壤有机质是衡量土壤健康水平和肥力高低的关键指标之一,也是植物养分元素循环的中心<sup>[29]</sup>。有机质的含量变化受诸多因素影响,如海拔、坡度、植被吸收和动物干扰等<sup>[7,30]</sup>。对于动物干扰因素,当前研究多集中在放牧强度对草地土壤有机质的影响,且研究结果仍不统一<sup>[7,31]</sup>,尚缺乏大型蹄类动物圈养干扰对天然林地土壤碳循环和生态分布的影响研究。本研究中,土壤有机质在不同土层深度下均随着圈养年限的增加呈下降趋势,且所有圈养处理在任意土壤深度均显著低于禁养处理。一方面可能是由于梅花鹿啃食、践踏等行为致使植被覆盖率逐渐降低,凋落物归还量减少,导致有机质归还与积累量相应降低。另一方面,表层土壤是有机质的富集层,而梅花鹿的活动对表层土壤有极大的物理扰动,极易造成土壤有机质的流失,例如在土壤的缓冲性较弱时,动物长期干扰会引起严重的土壤团粒结构破坏,减弱土壤对有机质固定和储存的能力<sup>[14-15]</sup>。此外,本研究中土壤有机质和含水率对梅花鹿圈养具有一致的响应趋势,且两者具有正相关性(图 6)。有研究发现与禁牧相比,长期放牧条件下地表裸露较多,土壤的蒸发作用剧烈,降雨消耗大,土壤水分含量降低,土壤透气性较好,外源有机残体在缺水条件下难腐烂并分解成小分子有机物质,同时土壤微生物呼吸与养分竞争强,对有机物需求及消耗量大,最终导致保存于土壤中的有机质减少<sup>[32-33]</sup>。

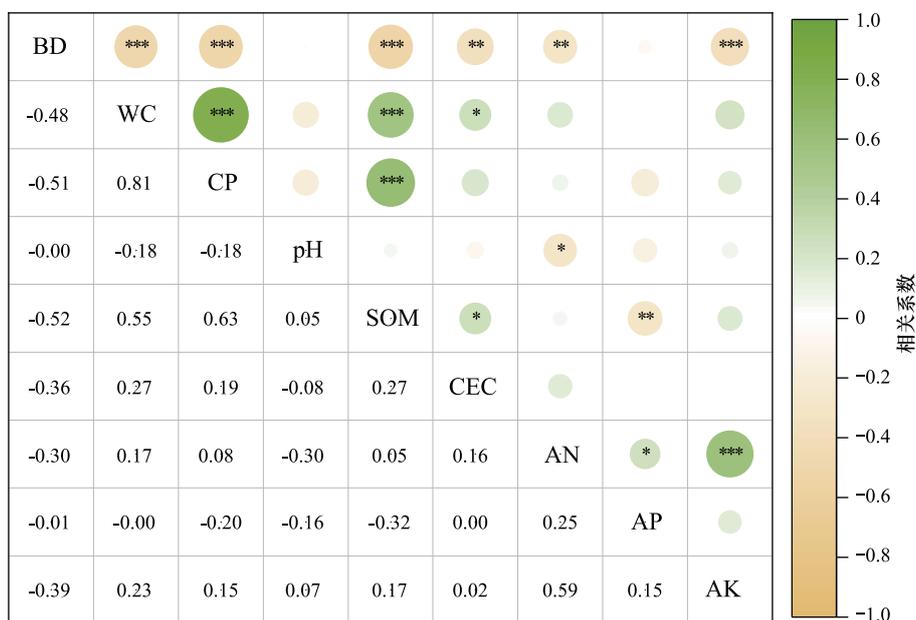


图 6 土壤理化性质的相关分析

Fig.6 The correlation analysis of soil physicochemical properties

BD: 容重 Bulk density; WC: 含水率 Water content; CP: 毛管孔隙度 Capillary pore; SOM: 有机质 Organic matter; CEC: 阳离子交换量 Cation exchange capacity; AN: 碱解氮 Available nitrogen; AP: 有效磷 Available phosphorus; AK: 速效钾 Available potassium; 图中数据为相关系数, \* 表示在 0.05 水平上显著相关; \*\* 表示在 0.01 水平上显著相关; \*\*\* 表示在 0.001 水平上显著相关

土壤阳离子交换量(CEC)具有增强土壤缓冲性能、改善土壤养分供应等重要作用,是土壤质量评价指标和测土配方的重要依据<sup>[34]</sup>。CEC 受到很多学者的广泛关注,且主要集中在放牧、垦殖、施肥等人为干扰方面<sup>[35-37]</sup>。对于野生动物圈养模式下整个土壤剖面上 CEC 的探究尚未涉足。本试验发现 CEC 随着圈养年限

的增加呈下降趋势,这类似于 CEC 随着牧羊强度增加而显著降低<sup>[6]</sup>,主要由于动物干扰破坏土壤结构、阻碍植被正常生长、改变各径级根系分布特征对 CEC 有一定的负反馈作用。土壤有机质中的有机胶体是土壤固相中 CEC 最大的部分,前人研究表明有机质是 CEC 的主要影响因素<sup>[36]</sup>。本研究中相关性分析表明(图 6)该区土壤有机质与 CEC 呈显著正相关。因此,保持研究区适宜 CEC 的关键在于保护有机质的自然积累。

土壤有效态氮、磷、钾含量与土壤肥力水平密切相关,是植物健康生长的关键养分<sup>[29]</sup>。土壤中有有效态氮、磷、钾含量易受到动物干扰、水温条件以及植物吸收的影响,动物活动通过采食、践踏、排泄等行为直接或间接地影响土壤中有效养分含量。研究表明随动物干扰增加,碱解氮含量增加<sup>[8]</sup>,有效磷含量降低<sup>[38]</sup>,速效钾含量增加<sup>[39]</sup>。另有研究发现随着动物干扰的增加,土壤中碱解氮、有效磷和速效钾的含量均呈下降趋势<sup>[38,40]</sup>。本研究表明土壤碱解氮、有效磷和速效钾含量呈圈养处理均高于禁养处理的现象,且表现为随圈养年限的增加而增加的趋势,这与以往的研究结果有所不同。产生此类结果首先可能是由于梅花鹿选择性觅食、践踏和翻拱等行为使得植被生物量、覆盖度降低,很多区域变为光裸地,导致植被对土壤有效养分利用量减少。其次梅花鹿的投喂饲料主要为玉米、麦麸等氮磷钾含量较高的物料,并且保护站人员会在植物匮乏的季节增加饲料投喂量,因此增加了梅花鹿排泄物对土壤的氮、磷、钾有效养分补充量,但养分补充量可能随土层的加深而下降。此外,本研究发现随着梅花鹿干扰年限增加,表层土壤速效钾的增幅小于碱解氮和有效磷增幅,原因可能是阳离子交换量减少引起土壤缓冲性能降低,使得土壤保钾功能减弱,导致钾养分的损失量相应较大。

### 3.3 林下植被地上生物量对梅花鹿干扰的响应

生物量是草地生态系统的核心生态指标,为草地生产功能的发挥提供关键的物质基础<sup>[41]</sup>。野生蹄类动物干扰对森林结构、组成有显著的长期影响,其中啃食、践踏、磨损、翻拱等行为会阻碍林下植被更新,减少植被生物量,影响植被群落演替<sup>[4,42]</sup>。草本群落生物量可作为评价放牧干扰强度的主导因子之一<sup>[43]</sup>,许多研究表明随着干扰强度的增加,植物地上生物量逐渐降低,与本研究结果一致。可能由于梅花鹿对植物地上部分的啃食超过了生境的承载力,使得地上植被的及时补充与更新受阻<sup>[7,44]</sup>,同时长期的践踏与排泄行为可能会通过改变土壤微生物群落阻碍根系的养分吸收,从而降低生物多样性和植物生产力,最终导致植物地上生物量下降<sup>[45]</sup>。以往研究表明生物量降低还与植物功能性状及土壤养分条件变差密切相关<sup>[46]</sup>,本研究与原始区域相比,梅花鹿长期活动区域已出现明显的植物叶片损失,且土壤有机质含量及阳离子交换量等显著降低,使得植物地上光合部位留存量减少,养分供应能力限制光合作用发挥,从而不利于植被生长。

## 4 结论与建议

本研究表明,随着梅花鹿圈养年限的增加,土壤 pH、含水率、毛管孔隙度、有机质和阳离子交换量呈现降低的趋势,土壤容重、碱解氮、有效磷和速效钾呈现升高的趋势,同时林下植被地上生物量呈现减少现象。梅花鹿圈养 20 a 后土壤-植被系统失衡状况最为明显,其中对栖息地土壤容重、有机质和阳离子交换量和植物地上生物量的影响最为明显。说明在梅花鹿长期干扰(啃食、践踏、翻拱、排便等行为)下,土壤土体变紧实、缓冲性能减小、养分失衡和植被稀疏,引起严重的地表裸露、水土流失现象,导致梅花鹿的生境退化。

梅花鹿在同一区域的连续圈养年限不宜达到 20 a,建议保护站挑选其它适宜生境继续进行就地保护,并及时推进该区域生态修复工作,重点开展植被种植、改善土壤容重和增加土壤有机质、交换性阳离子含量的工作。

### 参考文献(References):

- [1] 王兵,任晓旭,胡文. 中国森林生态系统服务功能及其价值评估. 林业科学, 2011, 47(2): 145-153.
- [2] Wang T, Kang F, Cheng X, Han H, Bai Y, Ma J. Spatial variability of organic carbon and total nitrogen in the soils of a subalpine forested catchment at Mt. Taiyue, China. *Catena*, 2017, 155:41-52.
- [3] 刘世荣,王晖,栾军伟. 中国森林土壤碳储量与土壤碳过程研究进展. 生态学报, 2011, 31(19): 5437-5448.
- [4] Reimoser F. Steering the impacts of ungulates on temperate forests. *Journal for Nature Conservation*, 2003, 10: 243-252.

- [ 5 ] Kalisz S, Spigler R B, Horvitz C C. In a long-term experimental demography study, excluding ungulates reversed invader's explosive population growth rate and restored natives. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2014, 111(12): 4501-4506.
- [ 6 ] 范国艳, 张静妮, 张永生, 李刚, 王琦, 杨殿林. 放牧对贝加尔针茅草原植被根系分布和土壤理化特征的影响. *生态学杂志*, 2010, 29(9): 1715-1721.
- [ 7 ] 靳茗茗, 徐增让, 成升魁. 藏北高寒草地植被和土壤对不同放牧强度的响应. *生态学报*, 2020, 40(23): 8753-8762.
- [ 8 ] 任强, 艾翳, 胡健, 田黎明, 陈仕勇, 泽让东科. 不同强度牦牛放牧对青藏高原高寒草地土壤和植物生物量的影响. *生态学报*, 2021, 41(17): 6862-6870.
- [ 9 ] Morgane M, Jean-Louis M, Simon C, Catriona C, Léna S, Grayston Sue J. Belowground effects of deer in a temperate forest are time-dependent. *Forest Ecology and Management*, 2021, 493, 1, 119228.
- [ 10 ] Kolstad, A L, Austrheim G, Solberg E J, Venete A M A, Woodin S J, Speed J D M. Cervid exclusion alters boreal forest properties with little cascading impacts on soils. *Ecosystems*, 2018, 21(5): 1027-1041.
- [ 11 ] White M A. Long-term effects of deer browsing: composition, structure and productivity in a northeastern Minnesota old-growth forest. *Forest Ecology and Management*, 2012, 269: 222-228.
- [ 12 ] 鲍士旦. 土壤农化分析. 3 版. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [ 13 ] 王国梁, 刘国彬, 周生路. 黄土丘陵沟壑区小流域植被恢复对土壤稳定入渗的影响. *自然资源学报*, 2003, 18(5): 529-535.
- [ 14 ] 严积有, 徐凯然, 申新山. 放牧干扰对人工林土壤物理性状的影响. *水土保持通报*, 2008, 28(6): 138-141.
- [ 15 ] Tate K W, Dudley D M, Mcdougald N K, George M R. Effect of canopy and grazing on soil bulk density. *Kenneth Journal of Range Management*, 2004, 57(4): 411-417.
- [ 16 ] Wang C, Fu B J, Zhang L, Xu Z. Soil moisture-plant interactions: an ecohydrological review. *Journal of Soils and Sediments*, 2019, 19(1).
- [ 17 ] 丛丽, 于佳平, 王灵恩. 我国半资源消费型野生动物旅游景区时空演变特征及其驱动因素分析. *自然资源学报*, 2020, 35(12): 2831-2847.
- [ 18 ] 崔猛, 金武鹏, 骆岩, 王新宇, 高英志. 放牧对草原地下根系生产和根系动态影响的研究进展. *饲料研究*, 2020, 43(4): 102-106.
- [ 19 ] 周虎, 刘周, 庞春梅, 陈康民, 章书声, 杨淑贞, 徐爱春. 浙江天目山国家级自然保护区三种鹿科动物舔盐行为比较. *兽类学报*, 2021, 41(1): 99-107.
- [ 20 ] 陈玫妃, 曾辉, 王钧. 青藏高原高寒草地土壤水分生态特征研究现状. *中国草地学报*, 2015, 37(2): 94-101.
- [ 21 ] Gao Z Y, Niu F J, Wang Y B, Lin Z J, Luo J, Liu M H. Root-induced changes to soil water retention in permafrost regions of the Qinghai-Tibet Plateau, China. *Journal of Soils and Sediments*, 2018, 18(3): 791-803.
- [ 22 ] Bolin L G, Lau J A. Linking genetic diversity and species diversity through plant-soil feedback. *Ecology*, 2022, 103(7): e3692.
- [ 23 ] Sun D, Yang H, Guan D X, Yang M, Wu J B, Yuan F H, Jin C J, Wang A Z, Zhang Y S. The effects of land use change on soil infiltration capacity in China: a meta-analysis. *The Science of the Total Environment*, 2018, 626: 1394-1401.
- [ 24 ] Sequeira C H, Wills S A, Seybold C A, West L T. Predicting soil bulk density for incomplete databases. *Geoderma*, 2014, 213: 64-73.
- [ 25 ] 党倩楠, 王进鑫, 姚丽霞, 吕国利, 张瑞琦. 干旱荒漠区煤矸石山覆土区土壤水分物理性质的空间异质性. *应用生态学报*, 2021, 32(1): 281-288.
- [ 26 ] 苏松锦, 刘金福, 陈文伟, 旷开金, 唐蓉, 洪伟. 戴云山黄山松林土壤水分物理性质空间变异特征与格局. *资源科学*, 2014, 36(11): 2423-2430.
- [ 27 ] Dodge V J, Eviner V T, Cushman J H. Context-dependent effects of a reintroduced ungulate on soil properties are driven by soil texture, moisture, and herbivore activity. *Ecology and Evolution*, 2020, 10(19): 10858-10871.
- [ 28 ] Kleinhesselink A R, Magnoli S M, Cushman J H. Shrubs as ecosystem engineers across an environmental gradient: effects on species richness and exotic plant invasion. *Oecologia*, 2014, 175(4): 1277-1290.
- [ 29 ] 徐娜, 党廷辉, 刘文兆. 黄土高原沟壑区农田土壤养分与作物产量变化的长期监测. *植物营养与肥料学报*, 2016, 22(5): 1240-1248.
- [ 30 ] 姜霓雯, 童根平, 叶正钱, 程樟峰, 吕永强, 傅伟军. 浙江清凉峰自然保护区土壤肥力指标空间变异及其影响因素. *生态学报*, 2022, 42(6): 2430-2441.
- [ 31 ] 周国利, 程云湘, 马青青, 申波, 曲久, 田富, 常生华. 牦牛放牧强度对青藏高原东缘高寒草甸群落结构与土壤理化性质的影响. *草业科学*, 2019, 36(4): 1022-1031, 918.
- [ 32 ] 刘敏敏, 赵鸿彬, 张圣微, 叶德成, 林汐, 赵星宇, 王帅. 放牧到禁牧对草地土壤有机碳累积及其主控因子的影响. *生态学报*, 2023, 43(21): 8739-8748.
- [ 33 ] Yan Y C, Xin X P, Xu X L, Wang X, Yan R R, Murray P J. Vegetation patches increase wind-blown litter accumulation in a semi-arid steppe of Northern China. *Environmental Research Letters*, 2016, 11(12): 124008.
- [ 34 ] 聂三安, 葛体达, 肖和艾, Kozo Iwasaki, 张杨珠. 不同栽培管理方式下土壤交换性盐基特征差异分析. *土壤通报*, 2011, 42(5):

1064-1069.

- [35] 陈忠柳, 舒英格, 周鹏鹏. 喀斯特山区不同生态恢复模式土壤盐基离子的交换及分布特征. 水土保持学报, 2020, 34(4): 304-311, 319.
- [36] 李玉辉, 李源环, 邓小华, 周米良, 田明慧, 田峰, 张明发, 杨丽丽. 石灰和绿肥对不同种植制度植烟酸性土壤改良效果. 水土保持学报, 2018, 32(6): 365-370.
- [37] 吴海勇, 彭晚霞, 宋同清, 曾馥平, 黎星辉, 宋希娟, 欧阳资文. 桂西北喀斯特人为干扰区植被自然恢复与土壤养分变化. 水土保持学报, 2008, 22(4): 143-147.
- [38] 戎郁萍, 韩建国, 王培, 毛培胜. 放牧强度对草地土壤理化性质的影响. 中国草地, 2001, 23(4): 42-48.
- [39] Wang C T, Long R J, Wang Q L, Liu W, Jing Z C, Zhang L. Fertilization and litter effects on the functional group biomass, species diversity of plants, microbial biomass, and enzyme activity of two alpine meadow communities. *Plant and Soil*, 2010, 331(1): 377-389.
- [40] 李文, 李小龙, 刘玉贞, 王文虎, 乔欢欢, 师尚礼, 王世林, 王小军, 王金兰, 尹国丽, 曹文侠. 不同强度放牧对东祁连山高寒灌丛土壤理化特征的影响. 草原与草坪, 2020, 40(4): 8-15.
- [41] 刘岩, 李宝林, 袁焯城, 祁佳丽, 李睿. 基于三江源高寒草甸群落结构变化评估围栏封育对草地恢复的影响. 生态学报, 2021, 41(18): 7125-7137.
- [42] Ramirez J I, Jansen P A, den Ouden J, Goudzwaard L, Poorter L. Long-term effects of wild ungulates on the structure, composition and succession of temperate forests. *Forest Ecology and Management*, 2019, 432: 478-488.
- [43] 郝建锋, 余飞燕, 姚小兰, 陈聪琳, 喻静, 向琳, 齐锦秋. 放猪干扰对四川夹金山植物群落特征和生物量的影响. 生态学报, 2021, 41(24): 9645-9654.
- [44] 赵丽娅, 钟韩珊, 赵美玉, 张劲. 围封和放牧对科尔沁沙地群落物种多样性与地上生物量的影响. 生态环境学报, 2018, 27(10): 1783-1790.
- [45] 赵生龙, 左小安, 张铜会, 吕朋, 岳平, 张晶. 乌拉特荒漠草原群落物种多样性和生物量关系对放牧强度的响应. 干旱区研究, 2020, 37(1): 168-177.
- [46] 王娟, 张登山, 肖元明, 王博, 周国英. 物种多样性和功能性状驱动高寒草原地上生物量对长期禁牧的响应. 生态学报, 2023, 43(6): 2465-2475.