

# 高寒草地鼠兔干扰下不同地表类型的土壤属性特征

杨嘉仪<sup>1,2</sup>, 赵广举<sup>1,2</sup>, 穆兴民<sup>1,2</sup>, 田 鹏<sup>3</sup>, 高 鹏<sup>1,2</sup>, 孙文义<sup>1,2</sup>

(1.西北农林科技大学 水土保持研究所, 黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 陕西 杨凌 712100;

2.中国科学院 水利部 水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100; 3.西北农林科技大学 资源环境学院, 陕西 杨凌 712100)

**摘 要:**为探究高原鼠兔(*Ochotona curzoniae*)活动对高山草甸土壤理化性质和生物活性的影响,以青海省果洛藏族自治州玛沁县为研究区,选取受高原鼠兔影响的草地为研究对象,根据有无鼠兔扰动和有鼠兔扰动下的不同地表特征,将有无鼠兔扰动的地表划分为 4 种类型,分析了 4 种地表类型土壤理化性质和生物学性质,并采用主成分分析方法对不同地表类型草地进行土壤质量评价。结果表明:(1) 存在鼠兔扰动草地,洞口裸斑处土壤含水率、容重增加,土壤机械组成出现砂粒化发展趋势,土壤速效养分浓度升高,洞口裸斑处土壤碱解氮含量较扰动草地增加了 41.31%,有机质含量和阳离子交换量在洞口裸斑处最高。(2) 4 种地表类型土壤酶活性均有不同程度的差异,蔗糖酶活性在不同地表类型下无显著差异,洞口裸斑处脲酶含量最高为 3.31 mg/(d·g),磷酸酶和过氧化氢酶的活性在有鼠兔扰动下的 3 种地表类型均显著增加。(3) 通过对不同地表类型土壤质量进行评价,得分排序为:Ⅲ>Ⅳ>Ⅱ>Ⅰ,鼠兔频繁活动的洞口裸斑处土壤质量较佳。鼠兔扰动对土壤性质影响显著,不同地表类型土壤质量存在差异。因此,鼠兔扰动改变了鼠洞周边土壤性质,使其物理化学性质发生显著变化。研究结果对进一步认识高原鼠兔扰动影响下的草地土壤性质变化具有重要支撑作用,也为青藏高原生态系统的管理与保护提供参考。

**关键词:**高寒草地; 鼠兔扰动; 土壤理化性质; 土壤酶活性; 土壤质量评价

**中图分类号:**S812.2; S812.6

**文献标识码:**A

**文章编号:**1005-3409(2022)03-0115-06

## Soil Properties of Different Surface Types Disturbed by Plateau Pika in Alpine Meadow

YANG Jiayi<sup>1,2</sup>, ZHAO Guangju<sup>1,2</sup>, MU Xingmin<sup>1,2</sup>, TIAN Peng<sup>3</sup>, GAO Peng<sup>1,2</sup>, SUN Wenyi<sup>1,2</sup>

(1.State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Institute of Soil and

Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 2.Institute of Soil and Water

Conservation, Chinese Academy and Sciences and ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100, China;

3.College of Natural Resources and Environment, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

**Abstract:** In order to explore the effects of plateau pika (*Ochotona curzoniae*) activities on soil physicochemical properties and biological activities of alpine meadow, we selected the meadow affected by plateau pika in Maqin County, Qinghai Province as the research area. Four types of meadow soil were sampled according to the different land surface influenced by pika disturbance. The physical and chemical properties and biological properties of four meadow soils were analyzed. And the principal component analysis was used to evaluate the soil quality of different surface types of grassland. The results show that: (1) soil moisture content and bulk density increase due to pika disturbance; nutrient contents increase in the soil due to the influence of pika, organic matter and cation exchange capacity are the highest at the bare spot of the cave; (2) the soil enzyme activities in four types of sites are different; the highest urease content was 3.31 mg/(d·g) at the bare spot of the cave mouth, and phosphatase and catalase increase significantly in all three types of ground surface disturbed by pika; to summarize, the disturbance of pika can alter the physical-chemical properties of the grassland soil in Qinghai-Tibet Plateau; (3) through the evaluation of soil quality of different surface types, the scores are as follows: type Ⅲ>typeⅣ>typeⅡ>typeⅠ; the soil quality in the bare spot of the hole where the pika frequently moves is better; the disturbance of pika has a significant effect on soil properties, and

收稿日期:2020-04-11

修回日期:2020-05-11

资助项目:中国科学院 A 类战略性先导科技专项“泛第三极环境变化与绿色丝绸之路建设”(XDA20040202)

第一作者:杨嘉仪(1997—),女,四川德阳人,硕士研究生,主要研究方向:土壤侵蚀与水土保持。E-mail:yangjiayi11@nwfau.edu.cn

通信作者:赵广举(1980—),男,河南驻马店人,博士,研究员,主要从事土壤侵蚀与水土保持研究。E-mail:gjzhao@ms.iswc.ac.cn

there are differences in soil quality among different surface types. The results of this study are of great importance to further understand the effects of plateau pika disturbance on the soil properties of alpine grassland, and can provide reference for the management and protection of the Qinghai-Tibet Plateau ecosystem.

**Keywords:** alpine meadow; pika disturbance; soil physical and chemical properties; soil enzyme activity; soil quality assessment

高寒草地是青藏高原主要植被类型之一<sup>[1]</sup>。近年来,随着气候变化和人类活动加剧,不合理的土地利用方式使得青藏高原高寒草地退化日趋严峻<sup>[2]</sup>。草地退化带来了一系列生态环境问题如稀有动物减少甚至灭亡,草地群落结构恶化,优良牧草竞争力减弱,生态系统的平衡与稳定遭到不断破坏<sup>[3]</sup>,青藏高原草地退化已经成为政府和研究人员关注的热点。因此,研究青藏高原草地退化原因对于我国高原地区生态、经济和社会有重要意义。

青藏高原草地退化包括植被破坏和土壤恶化<sup>[4]</sup>,在草地退化演替过程中,植被的生物量、植被盖度、群落结构和物种多样性均发生变化,土壤物理性质、土壤化学性质、土壤酶活性也会随之发生改变。高原鼠兔是青藏高原地区特有的小型植食性哺乳类动物,广泛分布于低植被、视野开阔的高寒草地<sup>[5]</sup>。高原鼠兔通过挖穴来建造鼠丘,刨出的土壤堆积于洞口植被上,形成裸斑土丘,进而改变洞口处的草地土壤结构和性质,直接或间接地影响高寒草地生态系统的能量流动和物质循环<sup>[6]</sup>。有研究结果表明鼠兔数量的逐步增多是青藏高原草地退化、土壤质量下降和资源减少的主要原因之一<sup>[7]</sup>,高原鼠兔也因此被认为是草地退化的元凶之一。此外,一些研究发现高原鼠兔的扰动对高寒草地有积极作用<sup>[8-9]</sup>,表现在提高土壤有机质含量和土壤养分含量,进而可促进高寒草地植被的多样性。因此,针对鼠兔扰动对高寒草地土壤性质是改善还是破坏作用需要深入的研究。基于此,本研究以青海省果洛藏族自治州玛沁县为研究区,选取受高原鼠兔扰动草地为研究对象,分析有无受高原鼠兔扰动的草地土壤理化性质和生物学性质,并采用主成分分析方法对不同地表类型草地进行土壤质量评价,以

分析鼠兔扰动对青藏高原草地土壤性质的潜在影响,以期为青藏高原草地保护提供一定的依据。

## 1 研究区概况与方法

### 1.1 研究区概况

玛沁县位于青海省东南部(98°00′—100°56′ E, 33°43′—35°16′ N),果洛藏族自治州东北部,平均海拔 4 100 m 以上,属高原大陆性气候,年平均气温-3.8~3.5℃,日温差较大,牧草生长季 156 d,无绝对无霜期,年降水量在 423~565 mm,且多集中于 6—9 月份,年日照时间为 2 313~2 607 h<sup>[10]</sup>。全县总面积 1.34 万 km<sup>2</sup>,其中草场面积 117.57 万 hm<sup>2</sup>,可利用草场面积 108.53 万 hm<sup>2</sup>,占草场面积的 92.3%,组成草场的牧草种类繁多,绝大部分是中生、多年生牧草。主要优势种有矮生嵩草(*Kobresia humilis*),针茅(*Stipa capillata*),苔草(*Carex tristachya*)等,独特的高原气候,形成了以高山草甸土为主的土壤类型和以高寒草地为主的草原植被,盛草期时植被覆盖度可在 80%~100%<sup>[11]</sup>。

### 1.2 研究方法

1.2.1 不同地表类型划分 根据有无鼠兔扰动和有鼠兔扰动下的不同地表特征,将地表划分为 4 种类型(图 1),分别是:无鼠兔扰动草地、有鼠兔扰动草地、鼠兔洞口裸斑处、鼠洞 1 m 处草地。无鼠兔扰动草地是未受到高原鼠兔扰动的地表类型(图 1,类型 I);鼠兔扰动草地是受到鼠兔扰动的地表类型(图 1,类型 II);鼠兔洞口裸斑处是在受到鼠兔扰动的情况下,鼠洞洞口处因鼠兔挖掘活动掩盖原本植被形成裸斑地表(图 1,类型 III);鼠洞 1 m 处草地是受到鼠兔扰动的情况下,在鼠兔频繁出入洞口间距 1 m 的草地(图 1,类型 IV)。



类型 I



类型 II



类型 III



类型 IV

图 1 鼠兔扰动的不同地表类型

1.2.2 样地设置与样品采集 2020 年 7 月在青藏高原果洛藏族自治州玛沁县,选取没有鼠洞和鼠兔活动轨迹的平坦地区设为非扰动区,随机设置 8 个 25 m×25 m(625 m<sup>2</sup>) 大样方,每个大样方内随机设置 3 个 1 m×1 m 的小样方作为重复。根据土壤容重、土壤养分、酶活性指标分析需要,每个大样方取 1 个环刀,每个小样方用土钻取 2 份 300 g 的土样装袋、编号(1 份风干土带回实验室分析,1 份鲜土用干冰保存,保存时间在 24 h 内,用于土壤酶活性测定)。再选取有鼠洞和鼠兔活动轨迹的平坦地区设为扰动区,同样随机设置 8 个大样方,每个大样方内随机设置 3 个小样方作为重复,每个大样方取 1 个环刀,每个小样方取土样 2 份。同时,扰动区的每个大样方内选取 3 个有鼠兔最新扰动痕迹和洞口状况较好的鼠丘,在洞口裸斑处和洞口 1 m 处草地取 1 个环刀和土样。

1.2.3 样品测试与统计分析 本研究中土壤理化性质测定指标包括:土壤含水率、土壤容重、土壤机械组成、有机质、全氮、全磷、全钾、速效磷、速效钾、pH 值、阳离子交换量,土壤样品的采集、处理及测定方法主要参照《土壤农化分析(第三版)》<sup>[12]</sup>。土壤生物学性质测定指标包括:蔗糖酶、磷酸酶、脲酶、过氧化氢酶,土壤样品的采集、处理及测定方法主要参照《土壤酶及其研究法》<sup>[13]</sup>。

主成分分析法是一种经典的特征提取和降维方

法,土壤质量指标依据主成分分析法,选择主成分特征值大于 1 的主成分,由相关系数法确定指标权重,计算各指标相对得分。将无鼠兔扰动草地、有鼠兔扰动草地、鼠兔洞口裸斑处、鼠洞 1 m 处草地相比较,根据因子成分矩阵除以相应特征值的算术平方根算出因子权重,再将因子得分带入各个主成分得分方程式中计算不同地表类型土壤质量的得分  $F_j$ ,得到不同地表类型草地土壤质量综合得分。

2 结果与分析

2.1 高原鼠兔扰动下不同地表类型土壤物理性质

鼠兔扰动下不同地表类型土壤物理性质存在明显差异。由表 1 可知,在高原鼠兔扰动的影响下,不同地表类型土壤含水率和土壤容重具有相似性,均表现为洞口裸斑处的土壤含水率和土壤容重显著高于干扰草地处,无扰动草地、扰动草地和洞口 1 m 处草地之间无显著差异。不同地表类型土壤机械组成见图 2,无鼠兔扰动草地黏粒和粉粒组成最大,分别占 1.36%和 31.95%,鼠兔扰动下的 3 种地表类型黏粒组成无显著差异,粉粒组成在洞口裸斑处最小为 22.96%,与无鼠兔扰动草地差异极显著。无鼠兔扰动草地砂粒组成最小为 66.68%,与洞口裸斑处 76.33%的砂粒组成差异显著。含水率、土壤容重和土壤机械组成均为弱变异性( $CV \leq 10\%$ ),不同扰动条件下差异不显著。

表 1 高原鼠兔扰动下不同地表类型土壤物理性质

物理指标	地表类型	样本数	均值±标准差	最小值	最大值	变异系数
含水率/%	I	24	33.51±1.93 <sup>ab</sup>	28.89	36.03	1.25
	II	24	32.96±2.20 <sup>b</sup>	29.60	39.29	1.33
	III	24	34.54±3.10 <sup>a</sup>	30.58	41.01	1.34
	IV	24	33.42±1.94 <sup>ab</sup>	30.28	36.89	1.22
容重/(g·cm <sup>-3</sup> )	I	8	1.13±0.28 <sup>ab</sup>	0.70	1.41	2.01
	II	8	1.02±0.17 <sup>b</sup>	0.77	1.23	1.60
	III	8	1.28±0.14 <sup>a</sup>	1.02	1.45	1.42
	IV	8	1.15±0.27 <sup>ab</sup>	0.83	1.49	1.80
黏粒质量分数/%	I	24	1.36±0.65 <sup>a</sup>	0.55	2.36	4.29
	II	24	0.78±0.10 <sup>b</sup>	0.62	0.95	1.53
	III	24	0.71±0.16 <sup>b</sup>	0.41	1.09	2.66
	IV	24	0.88±0.24 <sup>b</sup>	0.44	1.45	3.30
粉粒质量分数/%	I	24	31.95±8.40 <sup>a</sup>	19.29	44.80	2.32
	II	24	23.83±2.14 <sup>bc</sup>	19.75	27.29	1.38
	III	24	22.96±3.43 <sup>c</sup>	16.47	32.23	1.96
	IV	24	26.16±4.68 <sup>b</sup>	17.46	35.87	2.05
砂粒质量分数/%	I	24	66.68±9.03 <sup>c</sup>	53.14	80.16	1.51
	II	24	75.39±2.23 <sup>ab</sup>	71.84	79.61	1.11
	III	24	76.33±3.58 <sup>a</sup>	66.68	83.12	1.25
	IV	24	72.96±4.92 <sup>b</sup>	62.76	82.10	1.31

注:同列不同小写字母表示差异显著( $p<0.05$ ),下同。



## 2.2 高原鼠兔扰动下不同地表类型土壤化学性质

由图 2 看出,洞口裸斑处速磷浓度含量最高为 9.83 mg/kg,显著高于扰动草地 6.99 mg/kg 的速效磷含量。速效钾浓度含量在 4 种地表类型差异显著,其大小顺序为 III>IV>II>I,在洞口裸斑处速效钾浓度含量达最大为 222.89 mg/kg,与在无扰动草地含 116.32 mg/kg 的速效钾浓度含量差异显著。扰动草地全氮含量显著高于非扰动草地,洞口裸斑处和

1 m 处草地均与非扰动草地和扰动草地无明显差异。洞口裸斑处碱解氮含量最高为 125.81 mg/kg,显著高于另外 3 种地表类型。洞口裸斑处有机质含量最高且含量显著高于另外 3 种地表类型,另 3 种地表类型有机质含量无明显差异。不同地表类型土壤 pH 值均呈中性偏弱碱性,洞口裸斑处阳离子交换量显著高于非扰动草地和扰动草地,扰动草地显著高于非扰动草地,其大小顺序为 III>II>IV>I。

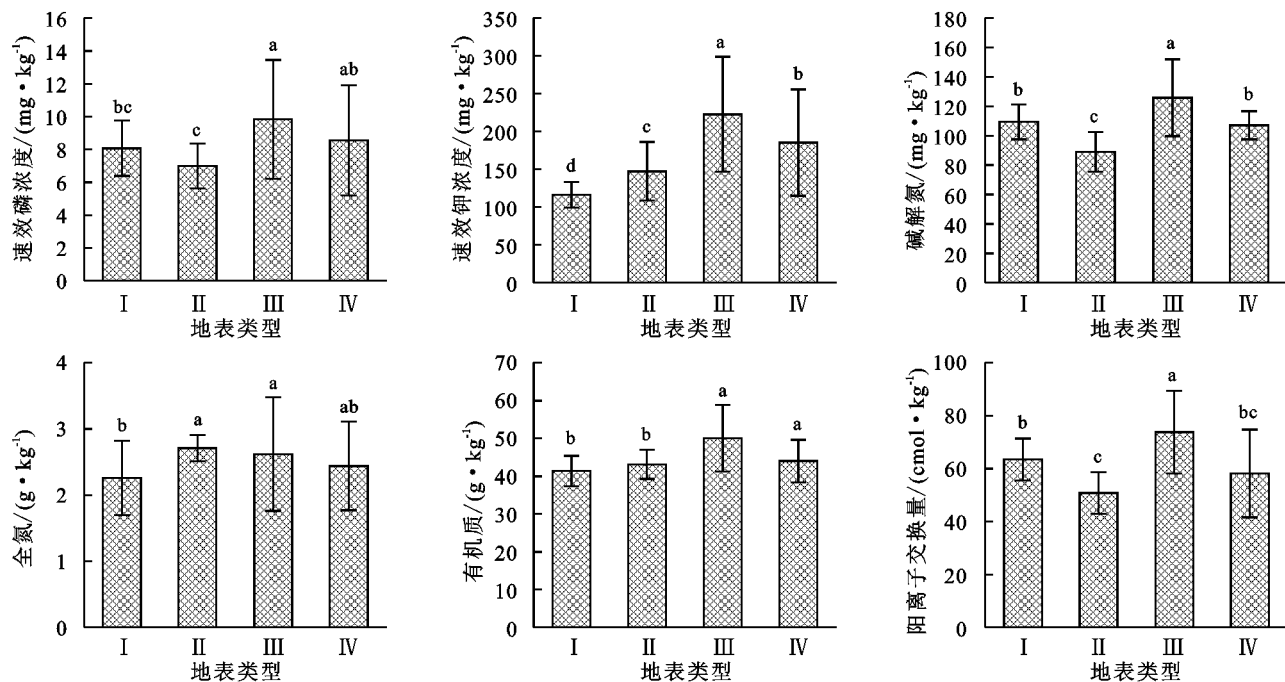


图 2 高原鼠兔扰动下不同地表类型土壤化学性质

## 2.3 高原鼠兔扰动下不同地表类型土壤生物学性质

土壤酶活性在不同地表类型出现不同的变化规律(图 3),扰动草地蔗糖酶含量为 68.91 mg/(d·g),相对洞口裸斑处蔗糖酶含量减少了 21.52%;在洞口裸斑处脲酶含量最高为 3.31 mg/(d·g),另外 3 种地表类型脲酶含量较为接近,无显著差异;扰动草地和洞口裸斑处磷酸酶含量无明显差异,非扰动草地土壤磷酸酶含量为 2.57 mg/(d·g),显著低于扰动草地和洞口裸斑处;无扰动草地过氧化氢酶含量为 2.42 ml/g,显著低于鼠兔扰动下的 3 种草地过氧化氢酶含量。

## 2.4 基于主成分分析的土壤性质综合评价

将本研究指标进行主成分分析。提取特征值大于 1 的主成分共 5 个,见表 2,方差贡献率分别是 38.215%,20.441%,8.578%,8.356%和 5.642%,5 个主成分累积方差贡献率达 81.232%。计算出不同地表类型土壤质量的综合得分  $F$  值并排序(表 3)。本研究中,不同地表类型主成分综合得分的计算是基于 18 个土壤物理、化学和生物指标对土壤质量的综合评价。计算结果表明,鼠兔干扰下不同地表类型土壤

质量综合得分高低为:III>IV>II>I。

## 3 讨论

### 3.1 高原鼠兔扰动下不同地表类型土壤理化性质

土壤养分在维持群落生产力和保证草地生长起着决定性作用<sup>[14]</sup>。鼠兔的采食和挖掘等一系列活动在一定程度上影响着高原草地的土壤性质<sup>[15]</sup>。本研究发现,鼠兔挖掘造穴活动使土壤结构疏松,促进积雪融水和降水储存于土层,有助于土壤储水能力和含水量增加,这与鼢鼠扰动对土壤理化性质的影响结果一致<sup>[16]</sup>。青藏高原草地土壤颗粒组成本身受土壤母质的影响差异不显著,鼠兔扰动使黏粒和粉粒含量减少,砂粒含量明显增多,使草地土壤呈粗质化趋势,地表裸斑面积增多,长期作用下会使土壤向干旱化、贫瘠化方向发展,可能推动土壤的退化<sup>[17]</sup>。4 种不同地表类型草地土壤均为中性偏微碱性(7.0~7.8),Gervais 等<sup>[18]</sup>研究表明,在挖洞土壤、土堆土壤和坑洼土壤与原状土壤之间,酸碱度在数值上差异不大,所以草地土壤 pH 值与鼠兔、牛羊等生物扰动没有一致的

相关性。另外,鼠兔扰动会使土壤深层有机质转移到表层土壤中,有机质的变化是影响阳离子交换量变化

的重要因素之一,鼠兔扰动导致草地有机质增多,因此洞口裸斑处阳离子交换量增多。

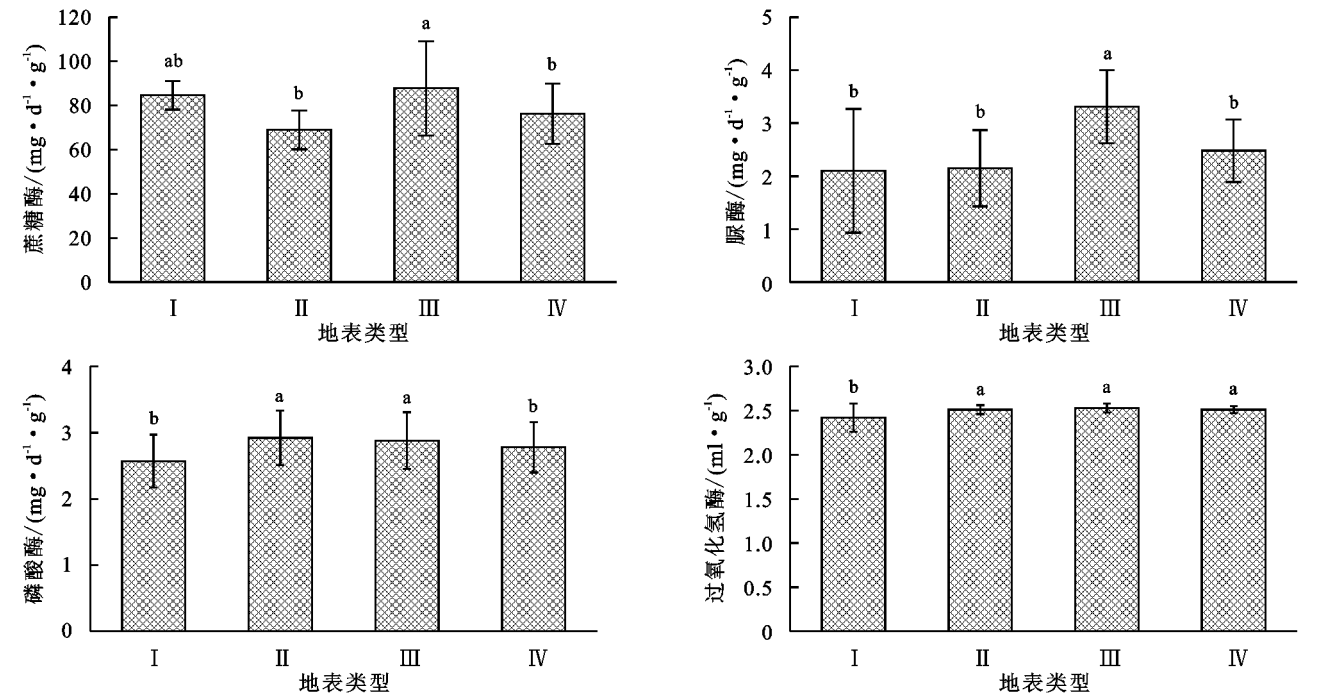


图 3 高原鼠兔扰动下不同地表类型土壤生物学性质

表 2 主成分提取结果

主成分	特征值		
	特征值	方差贡献率/%	累积方差贡献率/%
1	6.879	38.215	38.215
2	3.679	20.441	58.656
3	1.544	8.578	67.234
4	1.504	8.356	75.590
5	1.016	5.642	81.232

表 3 各主成分得分及综合得分

地表类型	主成分 1 得分	主成分 2 得分	主成分 3 得分	主成分 4 得分	主成分 5 得分	综合得分
I	2.061	1.094	0.880	0.176	0.330	-1.120
II	0.540	1.948	0.561	1.045	0.238	-0.657
III	2.552	0.935	0.113	0.620	0.190	1.219
IV	0.239	0.270	0.612	0.492	0.390	0.152

3.2 高原鼠兔扰动下不同地表类型土壤生物学性质

土壤酶活性是一种评价土壤质量变化、检测土壤中微生物群落变化的生物学指标<sup>[19]</sup>,主要来源于动植物、微生物和残体的分解物。本研究中蔗糖酶在 4 种不同地表类型中相差较小,与胡雷等<sup>[20]</sup>认为在不同退化演替阶段蔗糖酶活性无显著差异的结果相似,鼠兔有无扰动活动对土壤蔗糖酶活性影响不大。洞口裸斑处由于鼠穴的建造,草地植被破坏,氮素被较少得吸收利用,土壤可利用氮素增多,加之鼠兔排泄物的影响,土壤中有机氮含量增加,脲酶活性显著高于另外 3 种地表类型。有鼠兔扰动下的 3 种地表类型,磷酸酶和过氧化氢酶活性都显著高于无鼠兔扰动

草地,有研究发现高寒草地在中度退化时磷酸酶活性最高,显著高于轻度退化和重度退化<sup>[21]</sup>,可推测玛沁县高寒草地由于鼠兔的扰动可能导致草地退化。鼠兔扰动下土壤过氧化氢酶活性的显著提高,说明鼠兔扰动对土壤氮素和磷素的循环有促进作用。

3.3 不同地表类型土壤质量综合评价

土壤质量评价的有效方法众多,不同于马芊红等<sup>[22]</sup>通过建立隶属度函数,运用综合指数法来评价黄土高原纸坊沟流域不同土地利用类型土壤质量,本研究采用主成分分析法,综合评价鼠兔干扰下不同地表类型土壤质量。综合得分表明洞口裸斑处土壤质量较佳,且土壤粉粒、有机质、全磷和速效磷浓度在第 1 主成分的载荷系数最大,说明这些指标对土壤质量有决定作用。鼠兔的挖掘、造丘、采食、排泄等行为,导致洞口处草地植物根系残枝增多,植物死根可以为土壤提供有机质。有机质增加、土壤酶活性增强和土壤中养分含量增多可维持和提高土壤质量<sup>[23]</sup>。存在鼠兔扰动的 3 种地表类型其综合得分都高于非扰动草地类型,有鼠兔干扰草地土壤质量呈增加趋势,这与侯阁等<sup>[24]</sup>研究结果相似,适度的鼠兔干扰一定程度上会促进土壤养分的增加。

4 结论

(1) 鼠兔扰动后,草地土壤含水率、容重增加,土壤机械组成出现粗质化发展趋势,土壤速效养分浓度

提高,洞口裸斑处土壤碱解氮含量增加最为明显,对比扰动草地增加了41.31%。土壤有机质含量和阳离子交换量在洞口裸斑处最高。

(2) 4种地表类型土壤酶活性均有不同程度的差异,蔗糖酶活性在不同地表类型下无显著差异,洞口裸斑处脲酶含量最高为3.31 mg/(d·g),磷酸酶和过氧化氢酶的活性在有鼠兔扰动下的3种地表类型都显著提高。

(3) 通过对不同地表类型土壤质量进行评价,综合得分排序为:鼠兔洞口>Ⅳ>Ⅱ>Ⅰ。鼠兔频繁活动的洞口裸斑处土壤质量较佳。鼠兔扰动对土壤质地影响显著,不同地表类型土壤质量存在差异。

综上,鼠兔扰动导致草地土壤粗质化,地表裸斑增加,土壤表层的养分含量改变,洞口裸斑处土壤质量较好。高原草地退化不仅受鼠兔扰动影响,同时过度放牧、气候变化等也加速了青藏高原草地的退化。因此,高原草地退化的原因需不断研究,以便应对气候变化与日趋强烈的人类活动,也是实现青藏高原生态保护与可持续发展的基础。

#### 参考文献:

- [1] 李红琴,张法伟,毛绍娟,等.放牧强度对青海海北高寒矮嵩草草甸碳交换的影响[J].中国草地学报,2019,41(2):16-21.
- [2] 李军豪,杨国靖,王少平.青藏高原区退化高寒草甸植被和土壤特征[J].应用生态学报,2020,31(6):2109-2118.
- [3] 周侃,刘汉初,樊杰,等.青藏高原国家公园群区域人类活动环境胁迫强度与空间效应:以三江源地区为例[J].生态学报,2021,41(1):268-279.
- [4] 马志良,顾国军,赵文强,等.青藏高原东缘乔灌交错带地被物和土壤碳氮储量特征[J].水土保持研究,2020,27(5):17-23.
- [5] 郭新磊,宜树华,秦彧,等.基于无人机的青藏高原鼠兔潜在栖息地环境初步研究[J].草业科学,2017,34(6):1306-1313.
- [6] Smith A T, Badingqiuying, Wilson M C, et al. Functional-trait ecology of the plateau pika *Ochotona curzoniae* in the Qinghai-Tibetan Plateau ecosystem[J]. Integr Zool, 2019,14(1):87-103.
- [7] Niu K, Feng F, Xu Q et al. Impoverished soil supports more plateau pika through lowered diversity of plant functional traits in Tibetan alpine meadows[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2019,285:106621.
- [8] Pang X P, Yu C Q, Zhang J et al. Effect of disturbance by plateau pika on soil nitrogen stocks in alpine meadows[J]. Geoderma, 2020,372:114392.
- [9] Komonen M, Komonen A, Otgonsuren A. Daurian pikas (*Ochotona daurica*) and grassland condition in eastern Mongolia[J]. Journal of Zoology, 2003,259(3):281-288.
- [10] 孙金金,焦婷,李亚娟,等.高寒区草地一家畜优化配置研究:以青海省玛沁县1牧户为例[J].草地学报,2019,27(3):728-735.
- [11] 高金龙,孟宝平,杨淑霞,等.基于HJ-1 A卫星数据的高寒草地氮素评估:以青海省贵南县及玛沁县高寒草地为例[J].草业学报,2016,25(10):11-20.
- [12] 鲍士旦.土壤农化分析[M].3版.北京:中国农业出版社,2000.
- [13] 关松荫.土壤酶及其研究法[M].北京:北京农业出版社,1986.
- [14] 王长庭,龙瑞军,刘伟,等.高寒草甸不同群落类型土壤碳分布与物种多样性、生物量关系[J].资源科学,2010,32(10):2022-2029.
- [15] 于成,贾婷婷,庞晓攀,等.高原鼠兔干扰强度对高寒草甸土壤碳氮分布的影响[J].土壤学报,2016,53(3):768-778.
- [16] 杨晶,张倩,姚宝辉,等.高原鼠兔扰动对高寒草甸土壤理化特性及植物生物量的影响[J].草地学报,2020,28(2):492-499.
- [17] 李建明,王志刚,王爱娟,等.退耕还林恢复年限对岩溶槽谷区石漠化土壤物理性质的影响[J].农业工程学报,2020,36(1):99-108.
- [18] Gervais J A, Griffith S M, Davis J H, et al. Effects of Gray-tailed Vole Activity on Soil Properties[J]. North-west Science, 2010,84(2):159-169.
- [19] Raiesi F, Beheshti A. Soil C turnover, microbial biomass and respiration, and enzymatic activities following rangeland conversion to wheat-alfalfa cropping in a semi-arid climate[J]. Environmental Earth Sciences, 2014,72(12):5073-5088.
- [20] 胡雷,王长庭,王根绪,等.三江源区不同退化演替阶段高寒草甸土壤酶活性和微生物群落结构的变化[J].草业学报,2014,23(3):8-19.
- [21] 尹亚丽,王玉琴,鲍根生,等.退化高寒草甸土壤微生物及酶活性特征[J].应用生态学报,2017,28(12):3881-3890.
- [22] 马芊红,张光辉,耿韧,等.黄土高原纸坊沟流域不同土地利用类型土壤质量评价[J].水土保持研究,2018,25(4):30-35.
- [23] 李霞,朱万泽,舒树森,等.基于主成分分析的大渡河中游干暖河谷草地土壤质量评价[J].生态学报,2021,41(10):3891-3900.
- [24] 侯阁,詹天宇,刘苗.高山草原鼠兔(*Ochotona curzoniae*)洞口密度与植被物种和土壤性质的关系:以申扎县为例[J].草业科学,2019,36(4):1084-1093.