

高原鼠兔不同干扰强度对高山嵩草草甸土壤有机碳和全氮含量及其贮量的影响*

庞晓攀 王莹 贾婷婷 王倩 郭正刚**

兰州大学草地农业科技学院, 草地农业生态系统国家重点实验室 兰州 730020

摘要 利用高原鼠兔 (*Ochotona curzoniae*) 有效洞口数密度划分高原鼠兔干扰强度的方法, 研究不同高原鼠兔干扰强度对高山嵩草 (*Kobresia pygmaea*) 草甸土壤有机碳和全氮含量及其贮量的影响, 以期阐明高原鼠兔对土壤养分供给能力的影响。结果表明, 随高原鼠兔干扰强度增加, 高山嵩草草甸土壤有机碳和全氮含量以及其贮量均表现为先增加后降低的变化趋势, 在干扰强度 II 时最大 (对应的有效洞口数密度为 224 个/hm²) ($P < 0.01$)。高原鼠兔干扰条件下, 0-10 cm 土层的有机碳和全氮含量显著大于 10-20 cm 土层的有机碳和全氮含量 ($P < 0.01$), 而有机碳和全氮贮量在 0-10 cm 和 10-20 cm 土层间差异不显著。因此, 从高山嵩草草甸土壤养分调控角度看, 适量的高原鼠兔干扰能够提高高山嵩草草甸土壤有机碳和全氮的固持潜力。表 4 参 28

关键词 土壤有机碳贮量; 土壤全氮贮量; 高原鼠兔; 高山嵩草草甸
CLC S812

Effect of disturbance of plateau pika on soil organic carbon and nitrogen content and storage of *Kobresia pygmaea* meadow*

PANG Xiaopan, WANG Ying, JIA Tingting, WANG Qian & GUO Zhenggang**

State Key Laboratory of Grassland Agro-ecosystems, College of Pastoral Agriculture Science and Technology, Lanzhou University, Lanzhou, 730020, China

Abstract This study aimed to determine the effect of different disturbances of plateau pika on soil organic carbon and nitrogen content and their storage in the *Kobresia pygmaea* meadow. A field survey was conducted in August, 2013 to investigate the contents and storage of soil organic carbon and total nitrogen of *K. pygmaea* meadow at different disturbance degrees of plateau pika. The disturbance of plateau pika was divided into four degrees (I, II, III and IV) by the active burrow entrance density of plateau pika. Three 25 m × 25 m plots were designed at each disturbance degree, each plot consisted of five sample sites. The soil samples of each sample sites were collected in 0-10 cm and 10-20 cm depths, then removed plants roots, stone and other impurities. The soil samples were then air dried, crushed and sieved through a 2 mm screen, to be conserved for analyzing. The results showed that soil organic carbon and nitrogen content and their storage first increased and then decreased with the increase of the disturbance degree, peaking at II with 224 active burrow entrances per ha. Under the disturbance of plateau pika, soil organic carbon and nitrogen content at 0-10 cm layer was bigger than that at 10-20 cm layer, but their storage was not significantly different between the two layers in the *K. pygmaea* meadow. Therefore reasonable disturbance degree of plateau pika would increase the soil organic carbon and nitrogen sequestration potential in *K. pygmaea* meadow.

Keywords soil organic carbon storage; soil nitrogen storage; plateau pika; *Kobresia pygmaea* meadow

高山嵩草 (*Kobresia pygmaea*) 草甸是青藏高原地区重要的高寒草甸类型之一, 其土壤有机碳和全氮是高山嵩草草甸植物生长发育的主要因素, 两者间的合理组合能提高草甸生

产力^[1-2]。然而外界干扰往往会引起高寒草甸土壤有机碳和全氮含量以及其贮量的变化, 这势必影响草地生产力和植物多样性。

高原鼠兔 (*Ochotona curzoniae*) 是青藏高原特有的小型哺乳类动物^[3]。高山嵩草草甸因优势种低矮往往成为高原鼠兔的重要生活区。高原鼠兔主要通过采食和挖掘行为干扰高山嵩草草甸, 但这种干扰后果随着干扰程度不同而分异^[4-8]。已有研究表明, 适宜的高原鼠兔干扰能够提高高寒草甸的植物物种多样性、增加可食牧草生物量^[4]; 当高原鼠兔对高寒草甸的干扰强度过大时, 植物多样性降低, 不可食牧草比例

收稿日期 Received: 2014-12-10 接受日期 Accepted: 2015-01-25

*国家行业 (农业) 公益科技项目 (201203041)、国家自然科学基金项目 (31172258) 和兰州大学中央高校基本科研业务费专项资金 (lzujbky-2015-195) 资助 Supported by the Special Fund for Agro-scientific Research of Public Interest (201203041), the National Natural Science Foundation of China (31172258), and the Fundamental Research Funds for Central Universities (lzujbky-2015-195)

**通讯作者 Corresponding author (E-mail: guozhg@lzu.edu.cn)

增加^[4], 原有优势种群的生态位宽度变小^[6], 优势种群和主要伴生种群的空间分布格局明显改变^[8]. 高山嵩草草甸植物群落组分随着高原鼠兔干扰强度的改变而变化, 暗示着高山嵩草草甸土壤有机碳和全氮含量及其贮量也可能随着高原鼠兔干扰程度而发生变化, 这是因为土壤有机碳和全氮含量深刻影响植被变化^[9-10], 植物组分间对土壤有限资源的竞争, 是影响植物群落物种组成和群落动态的关键因素^[11-14]. 土壤有机碳及全氮贮量体现了土壤的碳氮固持潜力, 其大小受土壤碳氮含量和土壤容重的共同限制. 高原鼠兔打洞行为改变了不同深度土层的土壤容重^[5], 而土壤容重的变化势必引起土壤碳氮贮量分布格局发生变化, 从而影响土壤有机碳和全氮的固持潜力. 因此, 研究高原鼠兔干扰对土壤有机碳和全氮含量及其贮量的影响, 可以从养分供给视角揭示高原鼠兔干扰调控高山嵩草草甸植物组分变化机制.

由于高原鼠兔具有营家族式生活和运动迁移, 且穿梭于地下洞穴和地面等特征, 因此采用目视法直接观测单位面积高原鼠兔的密度, 以此划分高原鼠兔干扰强度具有一定的不确定性^[15]. 目前常用高原鼠兔有效洞口数密度划分高原鼠兔对高寒草甸的干扰强度^[4-8, 16]. 然而已有研究在采用高原鼠兔有效洞口数密度划分干扰程度时, 忽略了草甸类型变化. 如Liu等分析高原鼠兔干扰对三江源地区高寒草地生态系统碳交换量影响时, 划分的不同干扰程度生境内高寒草甸的优势种明显不同^[17]. 孙飞达等人研究不同高原鼠兔有效洞穴对有机质和全氮的影响时, 划分的高原鼠兔有效洞穴密度的梯度时, 不同梯度样地的植物优势种明显不同^[18]. 高寒草甸优势种不同时, 意味着高寒草甸类型可能发生了变化, 因此, 忽略高寒草甸优势种的分异而确定不同高原鼠兔干扰程度的研究方法, 无法确定土壤性质的变化究竟是高原鼠兔干扰程度差异所引起的, 还是高寒草甸类型变化所引起的. 采用同一草甸类型研究高原鼠兔干扰程度对土壤有机碳和全氮含量及贮量的影响, 就能够较为精确地揭示高原鼠兔干扰对土壤有机碳和全氮含量与贮量的影响, 还能避免高寒草甸类型差异给研究结果带来的不确定性. 基于草甸类型土壤性质的分异性, 本研究以高山嵩草草甸为对象, 采用高原鼠兔有效洞口数密度划分其干扰强度的方法, 分析高原鼠兔干扰对土壤有机碳和全氮含量及其贮量的影响, 阐明高山嵩草草甸土壤有机碳和全氮固持潜力对高原鼠兔干扰的响应, 以期从养分供给角度为解释高原鼠兔干扰引起高山嵩草草甸植物组分变化提供科学依据, 并遴选出适宜提高土壤有机碳和全氮的高原鼠兔干扰强度.

1 研究地区概况与方法

1.1 研究地区概况

研究地区位于青藏高原东北缘的甘肃省玛曲县境内(33°06'30"-34°30'15" N, 100°40'45"-102°29'00" E), 海拔3 300-4 806 m. 气候为高寒湿润性气候, 年均温度1.2 °C, 1月平均温度-10 °C, 7月平均温度11.7 °C. 年降水量约为564 mm, 主要集中于5-9月, 年蒸发量1 000-1 500 mm. 全年日照时数约2 613.9 h, 年内霜期大于270 d, 无绝对无霜期. 土壤为亚高山草甸土, 表层有5-10 cm生草层, 有机质含量可达10%-15%.

植被类型主要是高寒草甸, 以莎草科嵩草属的高山嵩草为优势种, 伴生种有小花草玉梅(*Anemone rivularis* var. *floreminors*)、矮火绒草(*Leontopodium nanum*)、达乌里秦艽(*Gentiana dahurica*)、莓叶萎陵菜(*Potentilla fragarioides*)等. 全县受鼠害危害的草地面积占总草地面积的比例为30%左右, 其中高原鼠兔是主要危害鼠类, 其主要生活于草丛低矮的环境, 一旦入侵, 整个生境几乎全部占据, 只是密度有所不同. 自20世纪70年代以来, 高原鼠兔危害面积逐渐加大, 单位面积有效洞口数量逐渐增加, 已经严重威胁高寒草甸生态系统的健康.

1.2 试验设计与取样

利用连续堵洞法于2012年5月在玛曲县阿孜站地势平坦地带建立选取了36个25 m × 25 m的样地, 用连续3 d堵洞法测定各样地的有效洞口数, 然后调查每个样地的裸斑面积和草丛高度, 有效洞穴密度从5个到52个/625 m². 为确定对土壤碳氮含量及贮量适宜的干扰强度, 将有效洞口数密度, 以有效洞口数、裸斑面积和草丛高度为变量, 将其聚成4个类群. 以每个类群的平均值为基准确定高原鼠兔有效洞口数密度梯度, 其分别为10 (10 ± 3)、15 (15 ± 2)、21 (21 ± 3)、31 (31 ± 4)^[6-7]. 每个梯度选择3个样地作为重复, 共计12个样地, 样地间隔25 m, 12个样地地貌地形条件一致, 草甸类型均为高山嵩草草甸, 土壤均为亚高山草甸土, 然后对这12个样地标记, 在牧草生长季采用围栏封育, 而在牧草非生长季放牧. 2013年8月再次查数每个样地内有效洞口数, 虽然每个样地有效洞口数较2012年有稍微的变化, 但其梯度效应仍然明显, 分别为8 (8 ± 2)、14 (14 ± 2)、23 (23 ± 4)、34 (34 ± 5)个/625 m² (相当于128、224、368、544个/hm²), 根据有效洞口数密度梯度, 我们将高原鼠兔的干扰划分为4个强度, 分别用I、II、III、IV代表. 土壤取样时, 每个样地采用“W”型布设5个取样点, 即每个梯度15个取样点, 样点间隔约8 m, 取样点位于高原鼠兔有效洞口1 m外的草甸上, 避免取样点位于洞口和裸斑. 在每个样点用容积为100 cm³的环刀按照0-10 cm和10-20 cm分层收集土样, 迅速装入铝盒, 带回室内立即称重, 再将土样放至105 °C烘箱烘至恒重, 测定土壤容重. 同时, 每个样点按照0-10 cm和10-20 cm分层再次收集土壤样品, 去除植物根、石头等杂质后, 在室温下自然风干, 充分研磨过0.25 mm的尼龙筛后, 以便分析土壤有机碳和全氮含量.

1.3 样品分析

土壤有机碳采用重铬酸钾容量法-外加热法测定, 土壤全氮采用凯氏定氮法.

1.4 数据分析

土壤容重计算公式为: 土壤容重 = $(W_1 - W_0) / V$, 式中, W_1 为烘干土+铝盒重量(g), W_0 为铝盒重量(g), V 为环刀容积. 碳贮量的计算公式为: $\text{SOCD} = H \cdot B_i \cdot \text{SOC} \cdot 0.1$, 其中, SOCD 是土壤有机碳贮量(t hm⁻²), H 是土壤土层厚度(cm), B_i 是土壤土层容重(g cm⁻³), SOC 是土壤有机碳含量(g kg⁻¹). 氮贮量计算公式为: $\text{STND} = H \cdot B_i \cdot \text{STN} \cdot 0.1$, 其中 STND 是土壤全氮贮量(t hm⁻²), H 是土壤土层厚度(cm), B_i 是土壤土层容重(g cm⁻³), STN 是土壤全氮含量(g kg⁻¹). 土壤碳氮贮量大小反映土壤碳氮固持潜力的大小.

不同土壤深度的有机碳和全氮含量存在差异, 但不同高

原鼠兔干扰水平改变了土层的物理性质,从而可能改变了原来土层有机碳和全氮的分布特征,因此本研究将干扰强度和土壤深度作为分类变量,先采用Two-Way ANOVA 进行双因素方差分析,后多重比较采用LSD分析,统计软件为SPSS 17.0.

2 结果

2.1 高原鼠兔干扰对土壤有机碳含量的影响

不同高原鼠兔干扰强度对土壤有机碳含量具有明显的影响,表现为高原鼠兔干扰强度从Ⅰ增加至Ⅳ的过程中,土壤有机碳呈先增加后降低的变化态势,且在干扰水平为Ⅱ时最大($P < 0.01$) (表1); 0-10 cm土层土壤有机碳含量显著高于10-20 cm土层土壤有机碳($P < 0.01$); 但土壤有机碳含量对高原鼠兔干扰与土层的交互效应响应不显著.

表1 高原鼠兔不同干扰强度下不同土层的土壤有机碳含量

Table 1 SOC content at different soil layers under disturbances of plateau pika

干扰强度 Disturbance degree	土壤有机碳含量 SOC content (w/g kg ⁻¹)		干扰强度主效应 Main effect of disturbance degree
	0-10 cm	10-20 cm	
Ⅰ	45.309 ± 0.101	40.725 ± 0.093	42.017b
Ⅱ	46.024 ± 0.349	43.358 ± 0.883	44.691a
Ⅲ	39.131 ± 1.116	33.779 ± 0.896	36.455c
Ⅳ	37.922 ± 0.354	34.073 ± 0.912	35.997c
土层主效应 Main effect of soil layer	41.569a	37.984b	
显著性 Significance			
干扰水平 Disturbance degree		**	
土层 Soil layer		**	
干扰程度×土层 Disturbance degree × Soil layer		ns	

*和**分别表示0.05和0.01水平差异显著; ns表示差异不显著.

*: $P < 0.05$; **: $P < 0.01$; ns: not significant.

2.2 高原鼠兔干扰对土壤全氮含量的影响

0-10 cm和10-20 cm土层土壤全氮含量均随高原鼠兔干扰强度增加而表现为先增加后降低的变化趋势(表2), 但不同土层土壤全氮含量最大值出现的高原鼠兔干扰强度存异,

表2 高原鼠兔不同干扰强度下不同土层的土壤全氮含量

Table 2 STN content at different soil layers under disturbances of plateau pika

干扰强度 Disturbance degree	土壤全氮含量 STN content (w/g kg ⁻¹)	
	0-10 cm	10-20 cm
Ⅰ	2.892 ± 0.012b	2.107 ± 0.016e
	0-10 cm	3.117 ± 0.027a
Ⅱ	2.662 ± 0.097c	
	0-10 cm	2.779 ± 0.023b
Ⅲ	2.672 ± 0.034c	
	0-10 cm	2.909 ± 0.094b
Ⅳ	2.491 ± 0.024d	
显著性 Significance		
干扰水平 Disturbance degree		**
土层 Soil layer		**
干扰程度×土层 Disturbance degree × Soil layer		**

*和**分别表示0.05和0.01水平差异显著; ns表示差异不显著.

*: $P < 0.05$; **: $P < 0.01$; ns: not significant.

0-10 cm土层土壤全氮含量最大值对应的高原鼠兔干扰水平为Ⅱ, 而10-20 cm土层土壤全氮含量最大值对应的干扰强度是Ⅱ和Ⅲ; 在每一个高原鼠兔干扰强度下, 0-10 cm土层土壤全氮含量均显著高于10-20 cm土层土壤全氮含量($P < 0.01$).

2.3 高原鼠兔干扰对土壤有机碳贮量的影响

土壤有机碳贮量随高原鼠兔干扰强度的增加呈现先增加后降低的变化态势(表3), 在干扰水平为Ⅱ时最高($P < 0.01$), 而干扰强度过高与过低时, 土壤有机碳贮量均降低; 高原鼠兔干扰下土壤有机碳贮量在0-10 cm和10-20 cm土层之间差异不显著. 而高原鼠兔干扰强度与土层的交互作用对土壤有机碳贮量的影响不明显.

表3 高原鼠兔不同干扰强度下不同土层的碳贮量

Table 3 SOC storage at different soil layers under disturbance of plateau pika

干扰程度 Disturbance degree	土壤碳贮量 SOC storage (ρ/t hm ⁻²)		干扰水平主效应 Main effect of disturbance degree
	0-10 cm	10-20 cm	
Ⅰ	60.037 ± 0.744	54.837 ± 0.911	57.436b
Ⅱ	70.689 ± 0.647	70.564 ± 2.361	70.627a
Ⅲ	51.196 ± 3.767	52.053 ± 1.160	51.624c
Ⅳ	41.056 ± 0.189	43.888 ± 0.284	42.472d
显著性 Significance			
干扰程度 Disturbance degree		**	
土层 Soil layer		ns	
干扰程度×土层 Disturbance degree × Soil layer		ns	

*和**分别表示0.05和0.01水平差异显著; ns表示差异不显著.

*: $P < 0.05$; **: $P < 0.01$; ns: not significant.

2.4 高原鼠兔干扰对土壤全氮贮量的影响

高原鼠兔干扰对土壤全氮贮量具有明显的影响. 随高原鼠兔干扰强度增加, 土壤全氮贮量表现为先增加后降低的变化趋势(表4), 且干扰水平为Ⅱ时的土壤全氮贮量显著高于其他干扰水平下的土壤全氮贮量($P < 0.01$); 而土层及其与高原鼠兔干扰的交互均对土壤全氮贮量影响不显著.

表4 高原鼠兔不同干扰强度下不同土层的氮贮量

Table 4 STN storage at different soil layers under disturbances of plateau pika

干扰强度 Disturbance degree	土壤氮贮量 STN storage (ρ/t hm ⁻²)		干扰水平主效应 Main effect of disturbance degree
	0-10 cm	10-20 cm	
Ⅰ	3.685 ± 0.010	2.920 ± 0.027	3.302c
Ⅱ	4.803 ± 0.114	4.283 ± 0.307	4.543a
Ⅲ	3.580 ± 0.316	4.135 ± 0.296	3.857b
Ⅳ	3.081 ± 0.020	3.379 ± 0.131	3.230c
显著性 Significance			
干扰程度 Disturbance degree		**	
土层 Soil layer		ns	
干扰程度×土层 Disturbance degree × Soil layer		ns	

*和**分别表示0.05和0.01水平差异显著; ns表示差异不显著.

*: $P < 0.05$; **: $P < 0.01$; ns: not significant.

3 讨论

高山嵩草草甸内高原鼠兔干扰强度从Ⅰ增至Ⅳ(有效洞口数密度从128个/hm²增至544个/hm²)的过程中, 意味着高原

鼠兔对高山嵩草草甸的干扰水平逐渐增强. 随着高原鼠兔干扰水平的加强, 土壤有机碳含量及其贮量先增加后降低, 说明高原鼠兔干扰程度为Ⅱ时(对应的高原鼠兔有效洞口数密度为224个/hm²)能够增加土壤有机碳含量和贮量, 从而提高高山嵩草草甸土壤有机碳的固持潜力; 而高原鼠兔干扰程度过低或过大时, 高山嵩草草甸土壤有机碳含量和贮量降低, 说明过低或过高的高原鼠兔干扰程度减弱了土壤有机碳固持潜力. 这是因为适量的高原鼠兔干扰较低程度干扰能够增加土壤通气性, 增强土壤微生物活性, 增加了土壤粉粒比例^[5], 一方面提高了土壤微生物对动植物残体分解速率^[19], 另一方面土壤固持碳能力增加, 从而整体上增加了土壤有机碳含量和贮量, 增强了土壤有机碳的固持潜力. 然而高原鼠兔干扰程度过大时, 土壤裸斑数量增多, 蒸发量加大, 高山嵩草草甸生境早化^[15], 降低粉粒比例, 增加砂粒比例^[5], 一方面影响土壤微生物活动^[20], 从而降低了动植物残体的分解速率, 另一方面, 土壤碳大量丧失, 从而整体上降低了土壤有机碳的固持潜力. 土壤有机碳含量能够显著影响土壤氮矿化潜力^[21], 当可利用性碳源相对充足时, 氮的固定潜能高, 净氮矿化降低, 全氮含量增加; 相反, 当可利用性碳相对缺乏时, 氮的固定潜能低, 净氮矿化升高, 加速全氮分解^[22], 受土壤碳含量和贮量的驱动, 高山嵩草草甸土壤氮贮量及固持潜力对高原鼠兔干扰程度的响应趋同于土壤碳贮量及碳固持潜力. 因此高原鼠兔干扰对高山嵩草草甸土壤碳氮固持潜力的影响基本符合中度干扰理论.

高山嵩草草甸土壤碳氮含量的垂直分布均表现为浅层大于深层, 可能是浅层土壤积累较多的枯枝落叶和腐殖质, 另外高原鼠兔活动主要集中于地面^[23-24], 伴随着其觅食等活动常常在巢区附近排泄粪和尿, 各社群巢区的重叠分布, 地面排泄活动也可能是土壤表层有机质含量增加的原因之一^[25]. 高山嵩草草甸土壤碳氮含量对高原鼠兔干扰响应的结果趋同于放牧干扰以及不同退化阶段的结果, 如放牧对呼伦贝尔草原土壤碳氮含量的影响也表现为浅层大于深层^[26], 不同退化阶段高寒小嵩草草甸土壤有机碳在0-10 cm明显较高^[27]. 然而土层对高山嵩草草甸碳氮贮量的影响不明显, 主要原因是土壤碳氮贮量不仅受碳氮含量的影响, 而且受土壤容重以及土壤碳矿化的影响^[28]. 高原鼠兔干扰使高山嵩草草甸浅层土壤的致密结构遭受一定的程度的破坏, 浅层土壤结构变得相对疏松, 容重降低, 而浅层土壤容重的降低使土壤浅层和深层的有机碳和全氮贮量差异不明显. 土壤有机碳和全氮含量仍然表现为浅层大于深层, 但高原鼠兔干扰通过改变土壤浅层容重而改变了土壤有机碳和全氮贮量的垂直分布, 其浅层和深层间差异不显著.

4 结论

高原鼠兔通过掘土行为等干扰活动改变了高山嵩草草甸土壤碳氮含量及固持潜力, 而这种改变程度与干扰强度密切相关. 当高原鼠兔干扰强度为Ⅱ时(有效洞口数密度为224个/hm²), 土壤有机碳和全氮贮量明显增加, 而当高原鼠兔干扰强度为Ⅰ或超过干扰水平Ⅲ时, 土壤有机碳和全氮贮量均显著低于干扰水平为Ⅱ时的土壤有机碳和全氮贮量, 这说

明适宜的高原鼠兔干扰能够提高土壤碳氮的固持潜力, 而高原鼠兔干扰程度过弱或过强时, 则降低高山嵩草草甸土壤碳氮的固持潜力. 从土壤有机碳和全氮调控角度看, 草地鼠害的防治是将高原鼠兔的干扰水平控制在有利于高寒草甸正向演变的范畴内, 而不是大面积灭杀, 这为青藏高原地区高原鼠兔防控策略从大面积采用肉毒素灭杀, 向生态调控提供了理论依据. 然而, 本研究的结果是以高原鼠兔干扰区内植被覆盖区的土样为基础, 没有考虑高原鼠兔干扰区内裸斑土壤有机碳和全氮贮量的变化过程. 由于裸斑区和植被覆盖区的水热过程和土壤速效养分利用过程存在一定的差异, 因此, 今后研究取样时应充分考虑裸斑区.

参考文献 [References]

- Dong SK, Wen L, Yi YY, Wang XX, Zhu L, Li XY. Soil-quality effects of land degradation and restoration on the Qinghai Tibetan plateau [J]. *Soil Sci Soc Am J*, 2012, **76** (6): 2256-2264
- Ruiz-Sinoga JD, Romero Diaz A. Soil degradation factors along a Mediterranean pluviometric gradient in southern Spain [J]. *Geomorph*, 2010, **188** (3-4): 359-368
- Smith AT, Foggin JM. The plateau pika (*Ochotona curzoniae*) is a keystone species for biodiversity on the Tibetan plateau [J]. *Anim Conserv*, 1999, **2** (4): 235-240
- Guo ZG, Li XF, Liu XY, Zhou XR. Response of alpine meadow communities to burrow density changes of plateau pika (*Ochotona curzoniae*) in the Qinghai-Tibet plateau [J]. *Acta Ecol Sin*, 2012, **32**: 44-49
- Guo ZG, Zhou XR, Hou Y. Effect of available burrow densities of plateau pika (*Ochotona curzoniae*) on soil physicochemical property of the bare land and vegetation land in the Qinghai-Tibetan Plateau [J]. *Acta Ecol Sin*, 2012, **32**: 104-110
- 贾婷婷, 毛亮, 郭正刚. 高原鼠兔有效洞穴密度对青藏高原高寒草甸群落植物生态位的影响 [J]. *生态学报*, 2014, **34** (4): 869-877 [Jia TT, Mao L, Guo ZG. Effect of available burrow densities of plateau pika (*Ochotona curzoniae*) on plant niche of alpine meadow communities in the Qinghai-Tibet Plateau [J]. *Acta Ecol Sin*, 2014, **34** (4): 869-877]
- 李倩倩, 赵旭, 郭正刚. 高原鼠兔有效洞穴密度对高寒草甸优势植物叶片和土壤氮磷化学计量特征的影响 [J]. *生态学报*, 2014, **34** (5): 1212-1223 [Li QQ, Zhao X, Guo ZG. Effect of available burrow densities of plateau pika (*Ochotona curzoniae*) on leaf nitrogen and phosphorus stoichiometry of dominant plants and soil in alpine meadow [J]. *Acta Ecol Sin*, 2014, **34** (5): 1212-1223]
- 庞晓攀, 贾婷婷, 李倩倩, 雒明伟, 肖玉, 赵旭, 郭正刚. 高原鼠兔有效洞穴密度对高山嵩草群落及其主要种群空间分布特征的影响 [J]. *生态学报*, 2015, **35** (3): 873-884 [Pang XP, Jia TT, Li QQ, Luo MW, Xiao Y, Zhao X, Guo ZG. Effect of available burrow densities of plateau pika (*Ochotona curzoniae*) on characteristics and distribution pattern of *Kobresia pygmaea* community [J]. *Acta Ecol Sin*, 2015, **35** (3): 873-884]
- Van Wesemael B, Poesen J, de Figueiredo T. Effects of rock fragments on physical degradation of cultivated soils by rainfall [J]. *Soil Tillage Res*, 1995, **33** (3-4): 229-250
- Poesen JW, Torri D, Bunte K. Effects of rock fragments on soil erosion by water at different spatial scales: a review [J]. *Catena*, 1994, **23** (1-2):

- 141-166
- 11 Rubio A, Escudero A. Small-scale spatial soil-plant relationship in semi-arid gypsum environments [J]. *Plant Soil*, 2000, **220** (1-2): 139-150
- 12 Barbara BL, Walbridge MR, Aldous A. Patterns in nutrient availability and plant diversity of temperate North American wetlands [J]. *Ecology*, 1999, **80** (7): 2151-2169
- 13 Fransen B, de Kroon H, Berendse F. Soil nutrient heterogeneity alters competition between two perennial grass species [J]. *Ecology*, 2001, **82** (9): 2534-2546
- 14 Sieg CH, Uresk DW, Hansen RM. Plant-soil relationships on bentonite mine spoils and sagebrush grassland in the Northern High Plains [J]. *J Range Manage*, 1983, **36** (3): 289-293
- 15 韩天虎, 花立民, 许国成. 高原鼠兔危害级别划分[J]. 草业学报, 2008, **17** (5): 130-137 [Han TH, Hua LM, Xu GC. Rodent damage assessment on the plateau pika [J]. *Acta Pratacult Sin*, 2008, **17** (5): 130-137]
- 16 Johnsona WC, Collinge SK. Landscape effects on Black-tailed prairie dog colonies [J]. *Biol Conserv*, 2004, **115** (3): 487-497
- 17 Liu YS, Fan JW, Harris W, Shao QQ, Zhou YC, Wang N, Li YZ. Effects of plateau pika (*Ochotona curzoniae*) on net ecosystem carbon exchange of grassland in the Three Rivers Headwaters region, Qinghai-Tibet, China [J]. *Plant Soil*, 2013, **366** (1-2): 491-504
- 18 孙飞达, 郭正刚, 尚占环, 龙瑞军. 高原鼠兔洞穴密度对高寒草甸土壤理化性质的影响[J]. 土壤学报, 2010, **47** (2): 378-383 [Sun FD, Guo ZG, Shang ZH, Long RJ. Effects of density of burrowing plateau pika (*Ochotona curzoniae*) on soil physical and chemical properties of alpine meadow soil [J]. *Acta Pedol Sin*, 2010, **47** (2): 378-383]
- 19 朱剑兴, 王秋凤, 何念鹏, 王若梦, 代景忠. 内蒙古不同类型草地土壤氮矿化及其温度敏感性[J]. 生态学报, 2013, **33** (19): 6320-6327 [Zhu JX, Wang QF, He NP, Wang RM, Dai JZ. Soil nitrogen mineralization and associated temperature sensitivity of different Inner Mongolian grasslands [J]. *Acta Ecol Sin*, 2013, **33** (19): 6320-6327]
- 20 王俊华, 胡君利, 林先贵, 朱安宁, 戴珏, 王军涛, 李晶. 耕作方式对潮土碳氮磷转化相关微生物学性状的影响[J]. 应用与环境生物学报, 2013, **19** (5): 868-872 [Wang JH, Hu JL, Lin XG, Zhu AN, Dai J, Wang JT, Li J. Effects of tillage management on microbiological characteristics related to transformation of carbon, nitrogen, and phosphorus in luvo-aquic soil [J]. *Chin J Appl Environ Biol*, 2013, **19** (5): 868-872]
- 21 Chu HY, Grogan P. Soil microbial biomass, nutrient availability and nitrogen mineralization potential among vegetation-types in a low arctic tundra landscape [J]. *Plant Soil*, 2010, **329** (1-2): 411-420
- 22 Schimel DS, Parton WJ. Microclimatic controls of nitrogen mineralization and nitrification in short-grass steppe soils [J]. *Plant Soil*, 1986, **93** (3): 347-357
- 23 Smith AT, Gao WX. Social relationship s of adult black-lipped pikas (*Ochotona curzoniae*) [J]. *J Mammal*, 1991, **72** (2): 231-247
- 24 张堰铭, 张知彬, 魏万红, 曹伊凡. 高原鼠兔领域行为时间分配格局及其对风险环境适应的探讨[J]. 兽类学报, 2005, **25** (4): 333- 338 [Zhang YM, Zhang ZB, Wei WH, Cao YF. Time allocation of territorial activity and adaptations to environment of predation risk by plateau pikas [J]. *Acta Theriol Sin*, 2005, **25** (4): 333-338]
- 25 李文靖, 张堰铭. 高原鼠兔对高寒草甸土壤有机质及湿度的作用[J]. 兽类学报, 2006, **26** (4): 331-337 [Li WJ, Zhang YM. Impacts of plateau pikas on soil organic matter and moisture content in alpine meadow [J]. *Acta Theriol Sin*, 2006, **26** (4): 331-337]
- 26 闫瑞瑞, 辛晓平, 王旭, 闫玉春, 邓钰, 杨桂霞. 不同放牧梯度下呼伦贝尔草甸草原土壤碳氮变化及固碳效应[J]. 生态学报, 2014, **34** (6): 1587-1595 [Yan RR, Xin XP, Wang X, Yan YC, Deng Y, Yang GX. The change of soil carbon and nitrogen under different grazing gradients in Hulunber meadow steppe [J]. *Acta Ecol Sin*, 2014, **34** (6): 1587-1595]
- 27 王长庭, 龙瑞军, 王启兰, 景增春, 施建军, 杜岩功, 曹广民. 三江源区高寒草甸不同退化演替阶段土壤有机碳和微生物量碳的变化[J]. 应用与环境生物学报, 2008, **14** (2): 225-230 [Wang CT, Long RJ, Wang QL, Jing ZC, Shi JJ, Du YG, Cao GM. Changes in soil organic carbon and microbial biomass carbon at different degradation successional stages of alpine meadows in the Headwater Region of Three Rivers in China [J]. *Chin J Appl Environ Biol*, 2008, **14** (2): 225-230]
- 28 薛晶月, 张洪轩, 全权, 王若梦, 干友民, 何念鹏. 土地利用方式对中亚热带红壤碳矿化及其激发效应的影响[J]. 应用与环境生物学报, 2014, **20** (3): 516-522 [Effect of land-use type on soil carbon mineralization and its priming effect on red soils in the mid-subtropics of China [J]. *Chin J Appl Environ Biol*, 2014, **20** (3): 516-522]