

DOI: 10.11766/trxb201509010422

高原鼠兔干扰强度对高寒草甸土壤碳氮分布的影响*

于成 贾婷婷 庞晓攀 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 采用高原鼠兔 (*Ochotona curzonae*) 有效洞口数差异划分其干扰梯度的方法, 研究其不同干扰强度对高山嵩草 (*Kobresia pygmaea*) 草甸土壤有机碳和速效氮分布特征及耦合关系的影响。结果表明: 随着高原鼠兔干扰强度的增加, 植被覆盖区和裸斑生境窗区各土层有机碳含量均先升高后降低, 在干扰强度 II (有效洞口数密度为 192 个 hm^{-2}) 时显著升高达到最大值 ($p < 0.05$), 相比干扰强度 I 时增加了 21.51% 和 46.03%; 裸斑生境窗区速效氮含量先升高后降低, 在干扰强度 II 时最大且显著高于植被覆盖区 ($p < 0.05$), 高于植被覆盖区 155.63%。高原鼠兔干扰下植被覆盖区 0~10 cm 土层有机碳、速效氮和铵态氮含量均显著高于 10~20 cm 土层, 而硝态氮含量显著低于 10~20 cm 土层 ($p < 0.05$), 且表层土壤有机碳占整个土层的 69.74%; 裸斑生境窗区 0~10 cm 土层速效氮和铵态氮含量均显著低于 10~20 cm 土层, 硝态氮含量显著高于 10~20 cm 土层 ($p < 0.05$), 而不同土层间有机碳含量仅在干扰强度 I 时差异显著。高原鼠兔干扰下, 土壤有机碳与速效氮、硝态氮、铵态氮在植被覆盖区为极显著的负相关关系 ($p < 0.01$), 而在裸斑生境窗区为极显著正相关关系 ($p < 0.01$)。这说明高原鼠兔改变了土壤碳氮的耦合关系, 适宜的干扰强度能明显提高高山嵩草草甸土壤有机碳的含量和形成氮素含量较高的裸斑生境窗区。

关键词 高原鼠兔; 高山嵩草草甸; 土壤碳氮; 分布特征; 耦合关系

中图分类号 S812 **文献标识码** A

高原鼠兔 (*Ochotona curzonae*) 是青藏高原地区特有的小型哺乳类动物^[1], 也是该地区高寒草甸生态系统的关键种^[2], 其通过采食、挖掘、排泄等活动以及鼠尸参与草地生态系统的能量流动和物质循环, 对高寒草甸植被产生着重要作用^[2-3]。在其挖掘活动过程中, 底层土壤被大量移至地面, 不仅使土壤原有的结构发生变化, 而且在洞口附近因覆土作用形成大量裸斑, 这些裸斑镶嵌分布形成裸斑生境窗, 增加了高寒草甸地表的环境异质性, 改变了高寒草甸的地表景观^[4], 影响着区域内高寒草甸生态系统的土壤通气性和水热过程^[5-7], 从而直接或间接地影响着高寒草甸土壤的有机碳和速效氮。然而土壤碳氮是影响高寒草甸植

物的正常生长发育^[8]和有机质分解速率^[9]的两种核心营养元素, 其中土壤有机碳一定程度上决定土壤氮的矿化速率, 调控着土壤速效氮的供给能力^[9-10], 而土壤速效氮的富集则有利于高寒草甸土壤碳储量增加^[11]。因此, 高寒草甸生态系统内土壤碳氮之间紧密联系, 共同影响着高寒草甸的物种组成和生产力。

高原鼠兔干扰对土壤有机碳和速效氮的影响不仅与其存在与否有关^[12-13], 而且与其干扰强度有关^[14-15]。Guo 等^[14]研究表明, 土壤有机质含量随高原鼠兔有效洞口数密度的增加, 表现为先增加后降低的变化趋势, 但该研究划分高原鼠兔干扰梯度时, 忽略了高寒草甸植被优势种的变化, 因此无法

* 国家自然科学基金项目 (31172258) 和国家行业 (农业) 公益科技项目 (201203041) 资助 Supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 31172258) and the Special Fund for Agro-scientific Research of Public Interest (No. 201203041)

† 通讯作者 Corresponding author, E-mail: guozhg@lzu.edu.cn

作者简介: 于成 (1991—), 男, 湖北天门人, 硕士, 主要从事天然草地生态研究。E-mail: yuc11@lzu.edu.cn

收稿日期: 2015-09-01; 收到修改稿日期: 2015-10-30

确定土壤有机质的变化是高原鼠兔干扰所致还是植被类型变化所致。Liu等^[15]研究表明高原鼠兔洞口数的增加,降低了土壤铵态氮含量,增加了硝态氮含量,但对速效氮含量没有显著影响;而孙飞达等^[5]研究表明,高原鼠兔有效洞口数密度增加,会降低土壤有机质和速效氮含量。这两项研究虽然关注到了植被优势种变化,但忽略了裸斑生境窗区和植被覆盖区土壤性质的差异。上述研究虽然极好地证实了高原鼠兔干扰对高寒草甸土壤碳氮存在明显的影响,但因忽略裸斑生境窗或植被优势种变化,无法较为精确地揭示高原鼠兔干扰对高寒草甸土壤碳氮的影响机制。

青藏高原高寒草甸类型较多,其中高山嵩草(*Kobresia pygmaea*)草甸是其地带性植被之一^[16],其草层低矮,不仅是高原鼠兔的主要栖息地^[17],也是高原鼠兔极易致灾的草甸类型^[6]。因此,本研究以高山嵩草草甸为例,研究了高原鼠兔不同干扰强度下,高山嵩草草甸植被覆盖区和裸斑生境窗区土壤有机碳和速效氮的分布特征及碳氮关系,以期全面阐明高原鼠兔对高寒草甸土壤碳氮的影响。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于甘肃省玛曲县、青藏高原东缘($100^{\circ} 40' \sim 102^{\circ} 29' E$, $33^{\circ} 06' \sim 34^{\circ} 30' N$),海拔 $3\ 300 \sim 4\ 806\ m$ 。气候是以严寒为特征的高原湿润气候,年均温度 $1.2\ ^{\circ}C$,月均温差异较大,月均温最低的1月可达 $-10\ ^{\circ}C$,最高的7月可达 $11.7\ ^{\circ}C$ 。年均降水量约为 $564\ mm$,年均蒸发量 $1\ 000 \sim 1\ 500\ mm$ 。全年日照时间约 $2\ 614\ h$,年内霜期大于 $270\ d$,无绝对无霜期。

草甸类型为高寒草甸,以高山嵩草(*Kobresia pygmaea*)为主要优势种,以垂穗披碱草(*Elymus nutans*)、钝裂银莲花(*Anemone obtusiloba*)、小花草玉梅(*Anemone rivularis*)、鹅绒委陵菜(*Potentilla anserina*)、莓叶委陵菜(*Potentilla fragarioides*)和长毛风毛菊(*Saussurea hieracioides*)等为主要伴生种^[18]。土壤为亚高山草甸土,土壤中营养物质多以有机态存在,其表层有 $7\ cm$ 左右草皮层,有机质含量高达 $100 \sim 150\ g\ kg^{-1}$,土壤潜在肥力较高。全县 30% 左右的草地受到鼠害危害,尤其以高原鼠兔为最主要的鼠害,重度危害区其有效

洞口数高达 $1\ 400\ 个\ hm^{-2}$,严重影响到高寒草甸生态系统的健康运转^[19]。

1.2 研究方法

采用高原鼠兔有效洞口数密度差异划分其干扰强度梯度^[12, 18, 20-22],分析不同干扰强度对高山嵩草草甸土壤有机碳和速效氮的影响。2012年5月于玛曲县阿孜站选择地形地貌一致的平坦地区,随机设置36个 $25\ m \times 25\ m$ ($625\ m^2$)的样地,利用连续3 d堵洞法测定所有样地的有效洞口数^[18, 20];采用直径 $0.1\ m$ 、重 $7\ g$ 的有孔泡沫圆盘测定草丛高度^[23-24],每个样地重复测量20次,取其平均值作为样地的草丛高度;采用分割法测定单个裸斑面积^[25],样地内所有单个裸斑面积的总和为样地的裸斑面积。以样地内的有效洞口数密度、裸斑面积和草丛高度为变量进行聚类分析,将36个样地聚成4个类群,以每个类群的高原鼠兔有效洞口数密度的平均值为基准划分干扰强度梯度,分别为 160 (160 ± 48)、 240 (240 ± 32)、 336 (336 ± 48)、 496 (496 ± 64) $\ 个\ hm^{-2}$ ^[18, 20],每个水平选取3个样地作为重复,总计12个样地成为监测样地,样地内均为高山嵩草草甸。在每年5~7月的植物生长季内对样地进行围栏保护,非生长季进行放牧。2014年8月再次查数各类群样地的有效洞口数密度,分别为 112 (112 ± 32)、 192 (192 ± 48)、 352 (352 ± 64)、 608 (608 ± 48) $\ 个\ hm^{-2}$,虽然有效洞口数密度稍有变化,但梯度效应仍然明显,并以此划分4个干扰强度,分别用I、II、III、IV表示。根据植被盖度将草甸分为裸斑生境窗区(因高原鼠兔覆土而掩埋原来植被形成小块裸斑,其上恢复的植被盖度一般小于10%)和植被覆盖区(高原鼠兔没有覆土的地区,植被覆盖一般大于80%),在每个样地内随机选择5个裸斑生境窗区作为裸斑取样样方,在距离裸斑生境窗区 $1\ m$ 左右的植被覆盖区对应设置取样样方,即裸斑生境窗区和植被覆盖区各设置5个样方,每个样地共计10个取样样方。在每个样方内,用内径为 $5\ cm$ 的土钻随机取土样3次,即每个样地共取样30次,并按照 $0 \sim 10\ cm$ 和 $10 \sim 20\ cm$ 分层混合,共计取土样240份。去除土样中含有的植物根系、石粒和凋落物等杂质后于室内自然风干,充分研磨过 $0.25\ mm$ 尼龙筛后密封保存^[26],以备分析。

1.3 项目分析与测定

采用重铬酸钾氧化—外加热法进行土壤有机碳

含量的测定。本研究中土壤速效氮为硝态氮和铵态氮之和, 将待测土样以 2 mol L^{-1} 的KCl溶液按液土比 $10:1$ 进行浸提, 浸提完成后过滤, 然后采用全自动流动注射仪进行土壤中硝态氮和铵态氮含量的测定。

1.4 数据分析

以植被盖度、干扰强度、土层作为变量因素, 先对土壤有机碳、速效氮、硝态氮及铵态氮运用SPSS (17.0) 统计软件进行Three-way ANOVA三因素方差分析, 若具有显著作用, 则采用LSD法分析不同干扰强度、不同植被盖度区及不同土层间土壤有机碳和速效氮含量的差异。然后在固定干扰强度的影响因素后, 采用Two-tailed的Pearson相关性

分析方法分析土壤碳氮的偏相关关系。图、表均采用Excel (2003版) 软件绘制。

2 结 果

三因素ANOVA分析结果表明, 植被盖度、土层和高原鼠兔干扰强度对土壤有机碳、速效氮、硝态氮及铵态氮含量均有显著的独立作用和交互效应 ($p < 0.05$) (表1), 说明高原鼠兔覆土作用导致植被盖度的变化、土层及其干扰强度的不同均对高寒草甸土壤有机碳、速效氮、硝态氮及铵态氮的含量产生影响, 且三者之间有极显著的交互效应。

表1 高原鼠兔栖息地土壤碳氮含量的三因素方差分析

Table 1 Three-way ANOVA for soil carbon and nitrogen content of plateau pikas inhabited lands

变异来源 Source of variation	有机碳 SOC	速效氮 Available N	硝态氮 NO_3^- -N	铵态氮 NH_4^+ -N
植被盖度 Vegetation coverage	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001
土层 Soil layer	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001
干扰强度 Disturbance level	< 0.001	< 0.005	< 0.001	< 0.05
植被盖度 × 土层 Vegetation coverage × Soil layer	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001
植被盖度 × 干扰强度 Vegetation coverage × Disturbance level	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001
土层 × 干扰强度 Soil layer × Disturbance level	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001
植被盖度 × 土层 × 干扰强度 Vegetation coverage × Soil layer × Disturbance level	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001

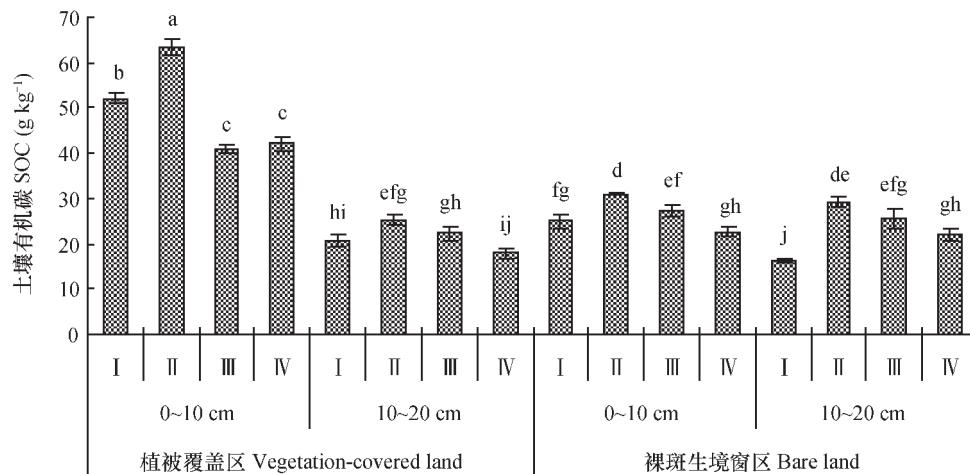
2.1 高原鼠兔干扰强度对土壤有机碳的影响

随着高原鼠兔干扰强度增加, 植被覆盖区和裸斑生境窗区 $0\sim 10\text{ cm}$ 和 $10\sim 20\text{ cm}$ 土层有机碳含量均呈现先上升后下降的变化态势(图1), 在干扰强度Ⅱ时均显著上升而达到最大($p < 0.05$), 其 $0\sim 20\text{ cm}$ 有机碳含量相比干扰强度Ⅰ时分别增加了 21.51% 和 46.03% 。植被覆盖区 $0\sim 10\text{ cm}$ 土层有机碳含量均显著高于裸斑生境窗区($p < 0.05$), 而 $10\sim 20\text{ cm}$ 土层有机碳含量差异不显著。相同干扰强度下, 植被覆盖区 $0\sim 10\text{ cm}$ 土层显著高于 $10\sim 20\text{ cm}$ 土层($p < 0.05$), 表层土壤有机碳含量占 $0\sim 20\text{ cm}$ 土层的 69.74% ; 裸斑生境窗区在干扰强度Ⅰ时也

表现为 $0\sim 10\text{ cm}$ 土层显著高于 $10\sim 20\text{ cm}$ 土层($p < 0.05$), 而其他干扰强度下不同土层间有机碳含量差异不显著。

2.2 高原鼠兔干扰强度对土壤速效氮、硝态氮及铵态氮的影响

随着干扰强度的增加, 植被覆盖区和裸斑生境窗区土壤速效氮的变化出现明显分异(图2)。植被覆盖区 $0\sim 10\text{ cm}$ 和 $10\sim 20\text{ cm}$ 土层速效氮含量表现为先降低后升高的变化过程, 在干扰强度Ⅱ时显著降低而达到最小值($p < 0.05$), 较干扰强度Ⅰ时降低了 38.50% ; 裸斑生境窗区各土层则表现为先上升后下降的变化趋势, 在干扰强度Ⅱ时显著



注: 无相同小写字母表示差异显著 ($p < 0.05$)。下同
Note: No same letters represent significant difference ($p < 0.05$). The same below

图1 高原鼠兔干扰强度对土壤有机碳含量的影响

Fig.1 Effect of disturbance gradient of plateau pika on SOC content

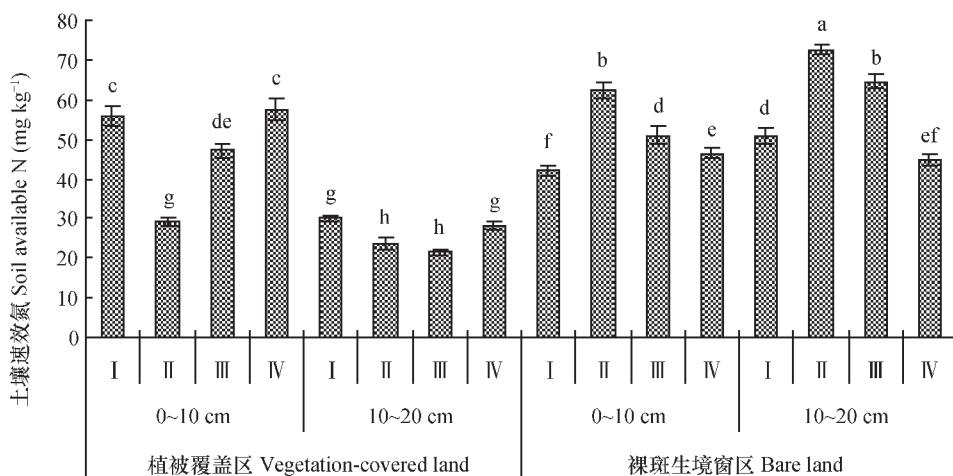


图2 高原鼠兔干扰强度对土壤速效氮含量的影响

Fig.2 Effect of disturbance gradient of plateau pika on content of soil available nitrogen

高于其他干扰强度 ($p < 0.05$)，较干扰强度 I 时升高了 45.30%。且干扰强度 II 时，裸斑生境窗区 0~20cm 速效氮含量高于植被覆盖区 155.63%，两者存在显著的差异 ($p < 0.05$)。

土壤速效氮含量的垂直分布差异也较大 (图 2)。不同土层土壤速效氮含量在植被覆盖区均表现为 0~10 cm 土层显著高于 10~20 cm 土层 ($p < 0.05$)；裸斑生境窗区在干扰强度 I、II、III 时，0~10 cm 土层显著低于 10~20 cm 土层 ($p < 0.05$)，而在干扰强度 IV 时不同土层间差异不显著。

高原鼠兔干扰强度从 I 增加至 II 的过程中，植

被覆盖区各土层硝态氮和铵态氮含量均呈现降低的态势 (图3, 图4)，在干扰强度 II 时显著低于干扰强度 I ($p < 0.05$)，其 0~20cm 硝态氮和铵态氮较干扰强度 I 分别降低了 35.44% 和 33.16%。随着干扰强度增加，裸斑生境窗区各土层硝态氮和铵态氮含量均呈现先升高后下降的趋势，在干扰强度 II 时显著升高 ($p < 0.05$)，其 0~20cm 硝态氮和铵态氮含量较干扰强度 I 时分别升高了 33.62% 和 45.41%，且均显著高于植被覆盖区 ($p < 0.05$)。

植被覆盖区和裸斑生境窗区土壤硝态氮和铵态氮含量的垂直分布特征的差异也较大 (图3, 图4)。高原鼠兔的同一干扰强度下，植被覆盖区

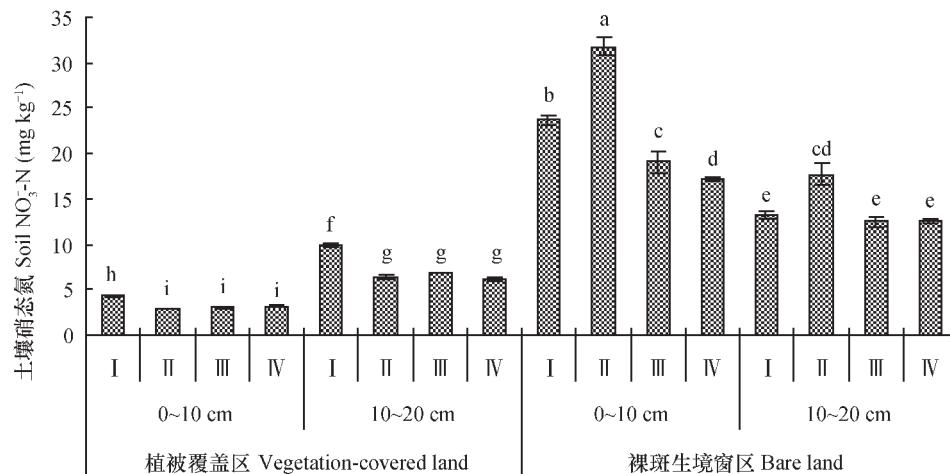


图3 高原鼠兔干扰强度对土壤硝态氮含量的影响

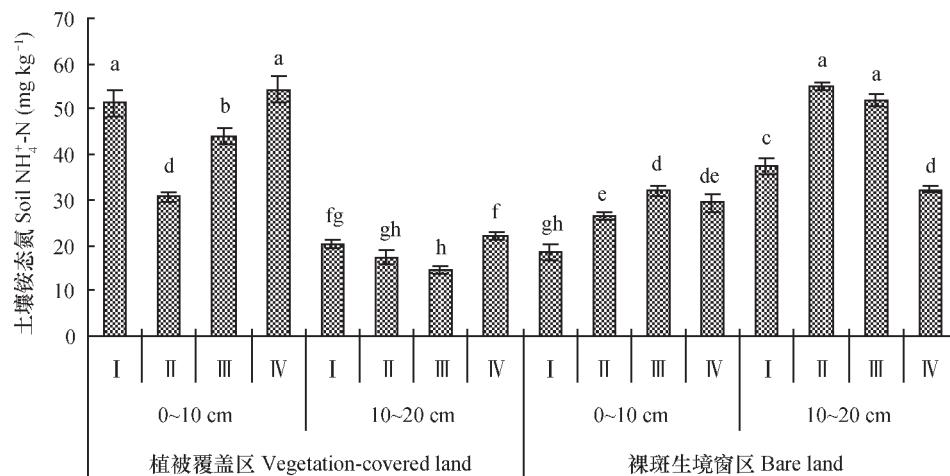
Fig.3 Effect of disturbance gradient of plateau pika on soil $\text{NO}_3^- \text{-N}$ content

图4 高原鼠兔干扰强度对土壤铵态氮含量的影响

Fig. 4 Effect of disturbance gradient of plateau pika on soil $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ content

0~10 cm 土层硝态氮含量均显著低于 10~20 cm 土层 ($p < 0.05$)，而铵态氮含量显著高于 10~20 cm 土层 ($p < 0.05$)；而裸斑生境窗区则相反，其 0~10 cm 土层硝态氮含量显著高于 10~20 cm 土层 ($p < 0.05$)，铵态氮含量显著低于 10~20 cm 土层 ($p < 0.05$)。

2.3 土壤有机碳与速效氮的关系

偏相关性分析结果表明，高原鼠兔干扰下，植被覆盖区 0~20 cm 土层土壤有机碳与速效氮、硝态氮及铵态氮均表现为极显著的负相关关系 ($p < 0.01$)，而裸斑生境窗区 0~20 cm 土层土壤有机碳与速效氮、硝态氮及铵态氮均表现为极显著的正相关关系 ($p < 0.01$) (表2)。这说明因高原鼠兔挖掘活动形成的裸斑生境窗明显改变了土壤有

机碳与速效氮、硝态氮及铵态氮的相关关系。

3 讨论

3.1 高原鼠兔干扰对高山嵩草草甸土壤碳氮水平分布特征的影响

高原鼠兔具有迁徙性、选择性采食和营家族式生活的特征，这些特征致使不同区域具有不同的干扰强度，而干扰强度的变化能引起草地生产力的改变^[22, 27]，必将大范围内导致系统不同区域土壤碳氮分布的不一致^[5, 14-15]。我们对植被覆盖区的研究结果表明，高原鼠兔干扰强度从Ⅰ增加到Ⅱ的过程中，土壤有机碳含量显著升高，速效氮、硝态氮和铵态氮含量显著降低，这是因为在高原鼠兔

表2 0~20 cm土层土壤有机碳与速效氮、硝态氮及铵态氮之间的相关系数

Table 2 Correlation coefficients of SOC with available N, NO_3^- -N, NH_4^+ -N in the 0~20 cm soil layer

项目 Item	植被覆盖区 Vegetation-covered land				裸斑生境窗区 Bare land			
	X_1	X_2	X_3	X_4	X_1	X_2	X_3	X_4
有机碳 SOC	X_1	1.00				1.00		
速效氮 Avail N	X_2	-0.69**	1.00			0.92**	1.00	
硝态氮 NO_3^- -N	X_3	-0.60**	0.76**	1.00		0.65**	0.65**	1.00
铵态氮 NH_4^+ -N	X_4	-0.68**	0.95**	0.69**	1.00	0.84**	0.93**	0.33
								1.00

*: $p < 0.05$, **: $p < 0.01$

干扰强度较小时, 高原鼠兔挖掘所致的裸斑生境窗面积较小, 不仅缓解了植物对土壤资源的竞争压力^[28], 而且其适宜的干扰增加了土壤通透性和总孔隙度^[14], 促进积雪融水和降水储藏于土层而增加土壤持水能力^[7], 其挖掘和排泄活动改善了地表土壤理化性质^[5, 28], 这不仅有利于微生物对凋落物的分解, 而且有利于植物对营养元素的吸收利用以及植被盖度和生物量的增加^[6, 29], 从而导致土壤速效氮、硝态氮及铵态氮含量减少而有机碳输入量增加。高原鼠兔干扰强度从Ⅱ增加至Ⅳ的过程中, 土壤有机碳含量显著降低, 速效氮和铵态氮含量显著升高, 而硝态氮含量未发生显著变化。当干扰强度超过Ⅱ以后, 高原鼠兔挖掘和采食活动的干扰强度增加, 草甸植被盖度和生物量降低^[15, 22, 27], 植物对营养元素的吸收利用降低, 故土壤有机碳的输入减少而速效氮和铵态氮的积累量增加。土壤中硝态氮含量较低且极易淋溶损失^[13], 故土壤硝态氮仍维持在极低水平。因此, 高原鼠兔干扰强度为Ⅱ(高原鼠兔有效洞口数密度为192个 hm^{-2})时有利于植被覆盖区土壤有机碳含量的增加, 这与孙飞达^[5]和Liu^[15]等的研究结果并不完全一致。因此, 评价高原鼠兔对高寒草甸植被覆盖区土壤的作用时不能忽略草地优势种变化的影响。

高原鼠兔在地表进行觅食及领域等活动时, 常在其洞口附近进行排泄活动^[2], 且其通过不断地挖掘活动的覆土作用而形成裸斑生境窗, 在高寒草甸上形成了微斑块效应^[3, 13], 有利于土壤为植物生长提供水肥的能力^[28, 30]。本研究结果表明, 在干扰强度Ⅱ时, 裸斑生境窗区不同土层土壤速效氮含量均显著高于植被覆盖区, 这一方面是由于高原鼠兔选择性地在其洞口周围进行排泄活动而提高表层土壤有机质含量, 间接加快微生物对有机质的

分解速率^[12-13], 且适宜挖掘活动形成的裸斑生境窗区在一定程度上促进了土壤的矿化作用^[13, 31], 另一方面是由于裸斑区缺少了植被对土壤速效氮的利用, 故裸斑生境窗区土壤速效氮含量较高。同时, 随着干扰强度的增加, 裸斑生境窗区土壤有机碳、速效氮、硝态氮以及铵态氮含量均表现为先升高后降低的变化态势, 在干扰强度Ⅱ时均处于较高水平。Guo等^[14]对裸斑生境窗区土壤有机碳的研究也发现了相同的现象, 说明干扰强度过高过低均不利于裸斑生境窗区土壤的矿化作用。干扰强度过低不能最大限度地发挥其对土壤有机质分解的促进作用, 干扰强度过高又将导致裸斑生境窗区面积占草甸总面积的比例增加^[3, 27], 土壤生境旱化^[14-15]。大面积的裸斑生境窗在冻融、水蚀和风蚀作用下, 土壤中砾石比例增加, 养分流失加剧^[31]。

土壤中铵态氮和硝态氮是速效氮的两种主要存在形式, 本研究结果表明, 裸斑生境窗区各土层硝态氮含量均显著高于植被覆盖区, 而表层土壤铵态氮含量显著低于植被覆盖区, 底层显著高于植被覆盖区。土壤中铵态氮和硝态氮之间的转化与土壤通透性和温湿度有着密切关系^[32], 在通气良好的条件下, 土壤铵态氮在硝化细菌和亚硝化细菌的共同作用下极易转变为硝态氮。适宜高原鼠兔挖掘形成的裸斑生境窗区土壤较植被覆盖区土壤有着更好的温湿度和通气性^[12], 极有利于硝化细菌数量和活性的提高, 且缺少植被对硝态氮的利用消耗, 故其硝态氮含量高于植被覆盖区, Wesche等^[33]研究蒙古鼠兔干扰对山地荒漠草原土壤硝态氮含量的影响中也发现了相似的结果。裸斑生境窗区表层土壤中硝化作用增强将大量的铵态氮转化为硝态氮, 导致表层土壤中铵态氮含量低于植被覆盖区。底层土壤中通气性降低, 硝化作用被削弱, 铵态氮的转换量

较表层有所降低，故底层土壤中铵态氮含量仍高于植被覆盖区。因此，高原鼠兔干扰强度为Ⅱ时，形成了氮素含量高于周围环境的裸斑生境窗，有利于土壤对植物生长所需氮素的供应，不能忽略适宜裸斑生境窗存在的微斑块效应作用。

3.2 高原鼠兔干扰对高山嵩草草甸土壤碳氮垂直分布特征的影响

植物死亡根系在微生物分解作用下丰富了土壤碳库，故植物根系在土壤剖面中的分布状态直接影响土壤有机碳的垂直分布^[34]。陶贞等^[35]研究表明不同类型高寒草甸土壤有机碳含量垂直分布均表现为表层高于底层；Guo等^[14]研究也表明高原鼠兔不同强度干扰下植被覆盖区土壤有机碳含量表现为表层大于底层；Dorji等^[36]研究喜马拉雅山脉东部不同土地利用方式下表层土壤有机碳含量明显较高。同时，随土层的不断增加，土壤透气性降低，微生物的数量及可供降解的有机质也迅速下降，故土壤无机氮含量也随土层的增加而降低^[32, 37]。本研究结果表明，植被覆盖区有机碳、速效氮和铵态氮含量均表现为表层高于底层。这说明植被覆盖区有机碳、速效氮和铵态氮的垂直分布具有同质性——随着土层的加深而降低，高原鼠兔干扰并不会打破高山嵩草草甸植被覆盖区有机碳、速效氮和铵态氮的垂直分布。然而，高原鼠兔干扰下土壤硝态氮的分布与铵态氮的分布明显不同，表现为表层低于底层。这是由于硝态氮不能被土壤胶体吸附，移动性较强，表层土壤中硝态氮在降水淋溶作用下更易向下层土壤转移，故导致表层土壤硝态氮含量低于底层土壤。

高原鼠兔干扰下，裸斑生境窗区土壤有机碳、速效氮、硝态氮和铵态氮的垂直分布特征发生了一定的改变。干扰强度Ⅰ时，土壤表层有机碳含量高于底层，当干扰强度高于Ⅰ时，裸斑生境窗区不同土层间有机碳含量无明显差异。干扰强度较小时，裸斑生境窗区面积较小，临近植被覆盖区对其具有一定的缓冲保护作用^[3]及高原鼠兔在其洞口附近的排泄活动作用，故裸斑生境窗区有机碳含量仍表现为表层高于底层。随着高原鼠兔干扰强度增大，裸斑生境窗区面积增大^[3, 27]，植被覆盖区对临近裸斑生境窗区的缓冲保护能力降低，且强烈的挖掘活动促使了上下层土壤的混合^[5, 13]，因而裸斑生境窗区不同土层间有机碳含量趋于一致。干扰强度低于Ⅳ时，土壤表层速效氮和铵态氮含量均低于底

层，而硝态氮含量则高于底层。这是因为裸斑生境窗区表层土壤缺少植被保护，水蚀和淋溶作用下将导致表层土壤速效氮含量降低^[38]。同时，表层土壤因较底层土壤具有更好的通气性和温度，土壤微生物硝化作用更强，微生物硝化作用下大量的土壤铵态氮被转化成硝态氮，从而导致表层土壤硝态氮含量高于底层，而表层土壤铵态氮含量低于底层。因此，挖掘活动使裸斑生境窗区土壤垂直结构变化导致土壤养分异质性增加。

3.3 土壤碳氮耦合关系对高原鼠兔干扰的响应

草地土壤中有机物质矿化作用是草地养分供给的主要来源，故土壤有机质与土壤其他养分之间均存在一定的相关性，尤其是与土壤全氮、无机氮具有显著的相关关系^[9-11]，且碳氮显著影响着植物的正常生长发育^[8]。高原鼠兔干扰引起土壤碳氮的变化必将导致土壤碳氮耦合关系的变化，本研究表明，高原鼠兔干扰下植被覆盖区土壤有机碳与速效氮、硝态氮及铵态氮均表现为显著负相关关系，而裸斑生境窗区则表现为显著正相关关系，这说明高原鼠兔影响土壤碳氮的相互耦合关系及其循环过程。高原鼠兔适宜范围内的干扰，不仅有利于增加植被覆盖区植物群落生长过程中对土壤氮素的利用效率从而提高土壤中有机碳的输入量，而且有利于加速裸斑生境窗区土壤的矿化速率从而提高其土壤氮素的供应能力。因此，植被覆盖区和裸斑生境窗区具有明显的优势互补作用，植被覆盖区在阻止临近裸斑生境窗区土壤性质恶化的同时也提高了土壤有机碳含量，而裸斑生境窗区在缓解植被覆盖区植物生长过程中对空间竞争压力的同时也加速土壤养分的循环过程，在一定程度上解除了土壤氮素对植物生长的限制作用^[39]。适宜强度的高原鼠兔干扰在天然高寒草甸上形成一系列镶嵌分布的裸斑生境窗有利于维持系统生产水平的相对稳定，使系统在稳定而良好的物质循环和能量流动的体系中运转。

4 结 论

高原鼠兔干扰强度的增加导致土壤碳氮分布特征及其耦合关系发生强烈变化，在干扰强度Ⅱ（高原鼠兔有效洞口数密度为192个 hm^{-2} ）的区域有利于土壤碳含量的提高，且形成镶嵌分布的氮素含量较高的裸斑生境窗，影响着植物对土壤营养资源的可利用性：高原鼠兔导致的微斑块效应极有利

于解除植物在资源和空间竞争中的相互抑制作用, 增加植物对裸斑生境窗及其边缘氮素的利用率, 为喜氮素禾草的扩张及“机会种”植物的人侵和繁殖提供了良好的空间和机会; 挖掘活动导致土壤垂直结构的变化, 显著增加了土壤营养成分的异质性; 干扰使土壤碳氮耦合关系发生变化, 形成了一个稳定而良好的物质循环和能量流动体系, 对高寒草甸生态系统功能的稳定和维持意义重大。因此, 评价高原鼠兔对高寒草甸生态系统的生态作用时不能忽略裸斑生境窗存在的意义和统一植被优势种的必要性而盲目进行评价。对高山嵩草草甸而言, 应将高原鼠兔密度维持在合理的范围内, 充分发挥其积极作用。

参考文献

- [1] Lai C H, Smith A T. Keystone status of plateau pikas (*Ochotona curzonae*) : Effect of control on biodiversity of native birds. *Biodiversity and Conservation*, 2003, 12 (9) : 1901—1912
- [2] Smith A T, Fogg M J. The plateau pika (*Ochotona curzonae*) is a keystone species for biodiversity on the Tibetan Plateau. *Animal Conservation*, 1999, 2 (4) : 235—240
- [3] Wu R X, Chai Q, Zhang J Q, et al. Impacts of burrows and mounds formed by plateau rodents on plant species diversity on the Qinghai-Tibetan Plateau. *The Rangeland Journal*, 2015, 37 (1) : 117—123
- [4] 石明伟, 张永超, 张典业, 等. 高寒草甸草地微斑块植物特征及其土壤性质的研究. *草业学报*, 2015, 24 (9) : 197—205
Shi M W, Zhang Y C, Zhang D Y, et al. Plant traits and soil properties in pasture mini-patches in an alpine meadow (In Chinese). *Acta Prataculturae Sinica*, 2015, 24 (9) : 197—205
- [5] 孙飞达, 郭正刚, 尚占环, 等. 高原鼠兔洞穴密度对高寒草甸土壤理化性质的影响. *土壤学报*, 2010, 47 (2) : 378—383
Sun F D, Guo Z G, Shang Z H, et al. Effects of density of burrowing plateau pikas (*Ochotona curzonae*) on soil physical and chemical properties of alpine meadow soil (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2010, 47 (2) : 378—383
- [6] 周雪荣, 郭正刚, 郭兴华. 高原鼠兔和高原鼢鼠在高寒草甸中的作用. *草业科学*, 2010, 27 (5) : 38—44
Zhou X R, Guo Z G, Guo X H. The role of plateau pika and plateall zokor in alpine meadow (In Chinese). *Pratacultral Science*, 2010, 27 (5) : 38—44
- [7] Ma Y, Wu Y, Wang X, et al. Effect of the disturbance of plateau pika (*Ochotona curzonae*) on soil water and soil temperature characteristics at alpine meadows in Qinghai-Tibet Plateau, China. *EGU General Assembly Conference Abstracts*, 2015, 17: 2839
- [8] Frank D A. Ungulate and topographic control of nitrogen: phosphorus stoichiometry in a temperate grassland; soils, plants and mineralization rates. *Oikos*, 2008, 117 (4) : 591—601
- [9] 颜淑云, 周志宇, 秦彧, 等. 玛曲高寒草地不同利用方式下土壤氮素含量特征. *草业学报*, 2010, 19 (2) : 153—159
Yan S Y, Zhou Z Y, Qin Y, et al. Characteristics of nitrogen contents under different land use conditions in alpine grassland of Maqu (In Chinese). *Acta Prataculturae Sinica*, 2010, 19 (2) : 153—159
- [10] 曹丽花, 刘合满, 赵世伟. 退化高寒草甸土壤有机碳分布特征及与土壤理化性质的关系. *草业科学*, 2011, 28 (8) : 1411—1415
Cao L H, Liu H M, Zhao S W. Distribution of soil organic carbon and its relationship with soil physical and chemical properties on degraded alpine meadows (In Chinese). *Pratacultral Science*, 2011, 28 (8) : 1411—1415
- [11] 李林森, 程淑兰, 方华军, 等. 氮素富集对青藏高原高寒草甸土壤有机碳迁移和累积过程的影响. *土壤学报*, 2015, 52 (1) : 183—193
Li L S, Cheng S L, Fang H J, et al. Effects of nitrogen enrichment on transfer and accumulation of soil organic carbon in alpine meadows on the Qinghai-Tibetan Plateau (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2015, 52 (1) : 183—193
- [12] 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. *兽类学报*, 2006, 26 (4) : 331—337
Li W J, Zhang Y M. Impacts of plateau pikas on soil organic matter and moisture content in alpine meadow (In Chinese). *Acta Theriologica Sinica*, 2006, 26 (4) : 331—337
- [13] 刘伟, 许庆民, 王溪, 等. 高原鼠兔挖掘活动对土壤中氮素含量的影响. *兽类学报*, 2010, 30 (1) : 35—44
Liu W, Xu Q M, Wang X, et al. Influence of burrowing activity of plateau pikas (*Ochotona curzonae*) on nitrogen in soils (In Chinese). *Acta Theriologica Simica*, 2010, 30 (1) : 35—44
- [14] Guo Z G, Zhou X R, Hou Y. Effect of available burrow densities of plateau pika (*Ochotona curzonae*) on soil physicochemical property of the bare land and vegetation land in the Qinghai-Tibetan

- Plateau. *Acta Ecologica Sinica*, 2012, 32 (2) : 104—110
- [15] Liu Y, Fan J, Harris W, et al. Effects of plateau pika (*Ochotona curzoniae*) on net ecosystem carbon exchange of grassland in the Three Rivers Headwaters region, Qinghai-Tibet, China. *Plant and Soil*, 2013, 366 (1/2) : 491—504
- [16] Wang Q J, Li S X, Wang W Y, et al. The despondences of carbon and nitrogen reserves in plants and soils to vegetations cover change on Kobresia pygmaea meadow of Yellow River and Yangtze River source region. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28 (3) : 885—894
- [17] Wangdwei M, Steele B, Harris R B. Demographic responses of plateau pikas to vegetation cover and land use in the Tibet Autonomous Region, China. *Journal of Mammalogy*, 2013, 94 (5) : 1077—1086
- [18] 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. *生态学报*, 2014, 34 (4) : 869—877
Jia T T, Mao L, Guo Z G. Effect of available burrow densities of plateau pika (*Ochotona curzoniae*) on plant niche of alpine meadow communities in the Qinghai-Tibet Plateau (In Chinese). *Acta Ecologica Sinica*, 2014, 34 (4) : 869—877
- [19] 张军.高原鼠兔种群数量对植被调控措施的响应. 兰州: 兰州大学, 2011
Zhang J. Population of plateau pika response measures of vegetation (In Chinese). Lanzhou: Lanzhou University, 2011
- [20] 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. *生态学报*, 2014, 34 (5) : 1212—1223
Li Q Q, Zhao X, Guo Z G. Effect of available burrow densities of plateau pika (*Ochotona curzoniae*) on leaf nitrogen and phosphorus stoichiometry of dominant plants and soil in alpine meadow (In Chinese). *Acta Ecologica Sinica*, 2014, 34 (5) : 1212—1223
- [21] 韩天虎,花立民,许国成.高原鼠兔危害级别划分. *草业学报*, 2008, 17 (5) : 130—137
Han T H, Hua L M, Xu G C. Rodent damage assessment on the plateau pika (In Chinese). *Acta Prataculturae Sinica*, 2008, 17 (5) : 130—137
- [22] 赵国琴,李广泳,马文虎,等.高原鼠兔扰动对高寒草地植物群落特征的影响. *应用生态学报*, 2013, 24 (8) : 2122—2128
Zhao G Q, Li G Y, Ma W H, et al. Impacts of *Ochotona pallasi* disturbance on alpine grassland community characteristics (In Chinese). *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2013, 24 (8) : 2122—2128
- [23] Rietkerk M, Ketner P, Burger J, et al. Multiscale soil and vegetation patchiness along a gradient of herbivore impact in a semi-arid grazing system in West Africa. *Plant Ecology*, 2000, 148 (2) : 207—224
- [24] Guo Z G, Li X F, Liu X Y, et al. Response of alpine meadow communities to burrow density changes of plateau pika (*Ochotona curzoniae*) in the Qinghai-Tibet Plateau. *Acta Ecologica Sinica*, 2012, 32 (1) : 44—49
- [25] 韩立辉,尚占环,任国华,等.青藏高原“黑土滩”退化草地植物和土壤对秃斑面积变化的响应. *草业学报*, 2011, 20 (1) : 1—6
Han L H, Shang Z H, Ren G H, et al. The response of plants and soil on black soil patch of the Qinghai-Tibetan Plateau to variation of bare-patch areas (In Chinese). *Acta Prataculturae Sinica*, 2011, 20 (1) : 1—6
- [26] 刘光崧.土壤理化分析与剖面描述. 北京: 中国标准出版社, 1996
Liu G S. Soil physical and chemical analysis and description of soil profiles (In Chinese). Beijing: Standards Press of China, 1996
- [27] 石红霄,于健龙.高原鼠兔洞口密度对高寒嵩草草甸植被及土壤水分的影响. *中国草地学报*, 2010, 32 (4) : 109—112
Shi H X, Yu J L. Influence of burrowing rodent density plots on the alpine Kobresia meadows structure and soil water content (In Chinese). *Chinese Journal of Grassland*, 2010, 32 (4) : 109—112
- [28] 张堰铭,刘季科.地下鼠生物学特征及其在生态系统中的作用. *兽类学报*, 2002, 22 (5) : 144—154
Zhang Y M, Liu J K. The biological characteristic of subterranean rodents and their roles in ecosystem (In Chinese). *Acta Theriologica Sinica*, 2002, 22 (5) : 144—154
- [29] Galiano D, Kubiak B B, Overbeck G E, et al. Effects of rodents on plant cover, soil hardness, and soil nutrient content: A case study on tuco-tucos (*Ctenomys minutus*). *Acta Theriologica*, 2014, 59 (4) : 583—587
- [30] Dong Q M, Zhao X Q, Wu G L, et al. A review of formation mechanism and restoration measures of “black-soil-type” degraded grassland in the Qinghai-Tibetan Plateau. *Environmental Earth Sciences*, 2013, 70 (5) : 2359—2370
- [31] 魏兴號,李森,杨萍,等.高原鼠兔洞口区侵蚀过程高山草甸土壤的变化. *中国草地学报*, 2006, 28 (4) : 24—29
Wei X H, Li S, Yang P, et al. Changes of soil physical and chemical property of alpine Kobresia meadow around the plateau pika

- entrances in the process of erosion (In Chinese) . Chinese Journal of Grassland, 2006, 28 (4) : 24—29
- [32] 张玉霞, 姚拓, 王国基, 等. 高寒生态脆弱区不同扰动生境草地植被及土壤无机氮变化特征. 草业学报, 2014, 23 (4) : 245—252
Zhang Y X, Yao T, Wang G J, et al. characteristic of vegetation and soil inorganic nitrogen concentrations under different disturbed habitats in a weak alpine ecosystem (In Chinese) . Acta Prataculturae Sinica, 2014, 23 (4) : 245—252
- [33] Wesche K, Nadrowski K, Reitzer V. Habitat engineering under dry conditions: The impact of pikas (*Ochotona pallasi*) on vegetation and site conditions in southern Mongolian steppes. Journal of Vegetation Science, 2007, 18 (5) : 665—674
- [34] Jobbágy E G, Jackson R B. The vertical distribution of soil organic carbon and it's relation to climate and vegetation. Ecological Applications, 2002, 10 (2) : 423—436
- [35] 陶贞, 沈承德, 高全洲, 等. 高寒草甸土壤有机碳储量及其垂直分布特征. 地理学报, 2006, 61 (7) : 720—728
- Tao Z, Shen C D, Gao Q Z, et al. Soil organic carbon storage and vertical distribution of alpine meadow on the Tibetan Plateau (In Chinese) . Acta Geographica Sinica, 2006, 61 (7) : 720—728
- [36] Dorji T, Odeh I O A, Field D J, et al. Digital soil mapping of soil organic carbon stocks under different land use and land cover types in montane ecosystems, Eastern Himalayas. Forest Ecology and Management, 2014, 318: 91—102
- [37] 田茂洁. 土壤氮素矿化影响因子研究进展. 西华师范大学学报(自然科学版), 2004, 25 (3) : 298—303
Tian M J. Review on the contributing factors to mineralization of soil nitrogen (In Chinese) . Journal of China West Normal University (Natural Sciences), 2004, 25 (3) : 298—303
- [38] Wang G Q, Wu B B, Zhang L, et al. Role of soil erodibility in affecting available nitrogen and phosphorus losses under simulated rainfall. Journal of Hydrology, 2014, 514: 180—191
- [39] Vitousek P M, Howarth R W. Nitrogen limitation on land and in the sea: How can it occur? Biogeochemistry, 1991, 13 (2) : 87—115

Effects of Plateau Pika (*Ochotona Curzoniae*) Disturbing Soil Carbon and Nitrogen Distribution in Alpine Meadow

YU Cheng JIA Tingting PANG Xiaopan GUO Zhenggang[†]

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

Abstract A study was conducted on how activities of plateau pika (*Ochotona curzoniae*) in *Kobresia pygmaea* meadows affect the distribution of soil organic carbon and readily available nitrogen in the soil and their coupling relationship in the effect, using the method of counting effective burrows density of the animals in the field as the basis for setting up a disturbance gradient. In the study, the activity or disturbance of the animals was divided into four levels in intensity. In Level I, 112 effective burrows hm^{-2} were found, Level II, 192 were, Level III, 352 were, and Level IV, 608 were. Results show that with the activity of the animal getting intensified, the contents of organic carbon in the 0 ~ 10 cm and 10 ~ 20 cm soil layers of the vegetation-covered land (over 80% of the land covered with vegetation) and bare land (patches of land devegetated by the burrowing animals, with only 10% of the vegetation left growing) rose significantly first and then dropped rapidly, and the contents were the highest in lands of Level II or about 21.51% and 46.03% higher than that in lands of Level I. And furthermore, content of organic carbon was much higher in the topsoil layers of vegetation-covered lands than in those of bare lands. The content of readily available N in the bare lands increased significantly first and then declined apparently, and the increase in bare lands of Level II was the biggest or 155.63% higher than that in the vegetation-covered lands, which had significant differences. Under the disturbance of the animals, contents of soil organic carbon, soil available nitrogen

and $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ decreased with soil depth in the vegetation-covered lands and were much higher in the 0~10 cm soil layer than in the 10~20 cm soil layer, however, content of $\text{NO}_3^- \text{-N}$ acted reversely and was lower in the 0~10 cm soil layer than in the 10~20 cm soil layer, where topsoil organic carbon accounted for 69.74% of the total in the soil. In the bare lands 0~10 cm soil layer, the soil available nitrogen and $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ content were significantly lower than in the 10~20 cm soil layer and the $\text{NO}_3^- \text{-N}$ content significantly higher than 10~20 cm soil layer, content of organic carbon did not varied much between the two soil layers except of Level I. Under the plateau pika's disturbance, soil organic carbon was in significantly negative relationships with available nitrogen, $\text{NO}_3^- \text{-N}$ and $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ in the vegetation-covered lands, but in significantly positive relationships in the bare lands. It indicates that the activities of the animals changed the coupling relationships of soil C and N and the disturbance of a proper intensity may significantly increase the content of soil organic carbon in the *Kobresia pygmaea* meadows and cause the formation of bare patches relatively high in nitrogen content, which provides room for expansion, colonization and reproduction of other grasses or opportunistic plant species. Burrowing activities of plateau pika can alter vertical distribution of soil nutrients, which enhances heterogeneity of the soil. All the findings in this study demonstrate that the study to investigate effects of plateau pika disturbing the soil in the alpine meadow should take into account the influence and meaning of the existence of bare patches and the necessity of unified vegetation types, and the population density of plateau pika should be controlled within a reasonable range in the *Kobresia pygmaea* meadow.

Key words Plateau pika; *Kobresia pygmaea* meadow; Soil carbon and nitrogen; Distribution; Coupling relationship

(责任编辑: 卢萍)