

DOI:10.11829/j.issn.1001-0629.2017-0530

张宝林, 江世高, 张春萍, 李旭东, 特木其勒图, 庄光辉, 赵建, 牛得草. 贺兰山西坡草地土壤碳特征及潜在退化损失分析. 草业科学, 2017, 34(11): 2200-2210.

Zhang B L, Jiang S G, Zhang C P, Li X D, Temuqiletu, Zhuang G H, Zhao J, Niu D C. Distribution of soil carbon and its losing risk with potential degradation on the grasslands along western slope of Helan mountain, China. Pratacultural Science, 2017, 34(11): 2200-2210.

贺兰山西坡草地土壤碳特征及 潜在退化损失分析

张宝林¹, 江世高², 张春萍², 李旭东², 特木其勒图³,
庄光辉¹, 赵建⁴, 牛得草²

(1. 内蒙古自治区阿拉善盟草原工作站, 内蒙古 巴彦浩特 750306; 2. 草地农业生态系统国家重点实验室,
兰州大学草地农业科技学院, 甘肃 兰州 730020; 3. 内蒙古自治区阿拉善盟草原监督管理局,
内蒙古 巴彦浩特 750306; 4. 内蒙古自治区阿拉善盟额济纳旗草原工作站, 内蒙古 额济纳 735400)

摘要:本研究分析了干旱区贺兰山西坡山前草地土壤碳的分布特征及其与气候、植被和土壤因子的关系,并探讨了潜在退化状态下土壤碳的变化特点。结果表明,随着海拔的增加,土壤有机碳含量和密度逐渐增加,表现为山地草原>荒漠草原>草原化荒漠;而土壤无机碳、全碳含量和密度随海拔增加先逐渐增加随后有所降低。偏相关及逐步回归分析表明,土壤有机碳含量与全氮显著相关,而影响土壤无机碳含量的因素因土层不同而有所差异,土壤无机碳与土壤容重显著相关,且受年降水量和年均温因子的共同影响。土壤碳密度受土壤碳含量的影响大于土壤容重。另外,当各高海拔草地群落潜在退化为低海拔草地群落时,土壤有机碳含量及密度变化较大,呈减少趋势,无机碳和全碳表现不一致,但当草地类型发生改变时,两指标减少幅度较大。上述结果表明,草地退化对土壤有机碳和无机碳影响显著,且土壤无机碳受土壤母质的影响也强烈。

关键词:干旱区;贺兰山;草地退化;土壤碳;潜在碳损失

中图分类号:S812.6⁺8 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-0629(2017)11-2200-11^{*}

Distribution of soil carbon and its losing risk with potential degradation on the grasslands along western slope of Helan mountain, China

Zhang Bao-lin¹, Jiang Shi-gao², Zhang Chun-ping², Li Xu-dong², Temuqiletu³,
Zhuang Guang-hui¹, Zhao Jian⁴, Niu De-cai²

(1. Alxa Alliance Grassland Station of Inner Mongolia, Bayan Hot 750306, Inner Mongolia, China;

2. State Key Laboratory of Grassland Agro-ecosystems, College of Pastoral Agriculture Science and
Technology, Lanzhou University, Lanzhou 730000, Gansu, China;

3. Alxa Alliance Grassland supervision and management Station of Inner Mongolia, Bayan Hot 750306, Inner Mongolia, China;

4. Alxa Alliance Ejin Banner Grassland Station of Inner Mongolia, Ejin Banner 735400, Inner Mongolia, China)

Abstract: In order to study the distribution and changes of soil organic carbon (SOC) and inorganic carbon (SIC) and total carbon with grassland potential degradation following altitudes along Helan Mountain, mean-

* 收稿日期:2017-09-09 接受日期:2017-10-20

基金项目:国家重点研发计划(2016YFC0500506);中国科学院战略性先导科技专项——应对气候变化的碳收支认证及相关问题(XDA05050406-8);兰州大学中央高校基本科研业务费专项资金资助(lzujbky-2017-47)

第一作者:张宝林(1964-),男,内蒙古巴彦淖尔人,畜牧师,本科,主要从事草原保护与技术推广。E-mail:nmamcyz001@163.com

共同第一作者:江世高(1988-),男,湖南邵阳人,硕士,主要从事草地营养生态学研究。E-mail:jiangshigao07@163.com

通信作者:牛得草(1981-),男,河南林州人,副教授,博士,主要从事草地营养生态学研究。E-mail:xiaocao0373@163.com

while explore their relationships with environment factors of climate, vegetation and soil, we collected soil samples and plant samples in three grassland types at different altitudes along Helan mountain in Alxa, Inner Mongolia, China. The different soil indexes which mainly included soil pH, Soil organic carbon, total carbon, soil total nitrogen (TN), total phosphorus, available nitrogen and soil bulk density were measured. The relationships between soil carbon with environment factors of climate, vegetation and soil were analyzed by integrated partial correlation analysis. The results showed, as the altitude increasing, soil organic carbon content and density increase and were expressed as grassland types: steppe > desert steppe > steppe desert. However, soil inorganic carbon and total carbon content and density increase gradually with altitude increasing, but it slightly decreased at the grassland at altitude of 2 100 m. Integrated partial correlation analysis showed TN was significantly correlated with soil organic carbon. While, the factors affecting soil inorganic carbon varied greatly. Soil bulk density was significant correlated with soil inorganic carbon and annual rainfall and annual average temperature were the main factors too. Because soil carbon density was influenced greater by soil carbon content than soil bulk density, similar to soil carbon content, soil carbon density in steppe was significantly greater than soil carbon density in steppe desert. Additionally, if the grassland at the higher altitude changes to the situation as the lower altitude, soil organic carbon content and density decreased, but soil organic and total carbon content and density decreased only when the grassland types changed. The whole research revealed that the degradation of the grassland influenced both soil organic and inorganic carbon content and density, and the soil development influenced the soil organic carbon characteristics too.

Key words: dryland; Helan Mountain; grassland degradation; soil carbon; potential loss of soil carbon

Corresponding author: Niu De-cao E-mail: xiaocao0373@163.com

自工业革命以来,由于人类活动的加剧,大气二氧化碳(CO₂)浓度持续增加,严重影响了全球碳循环的平衡^[1-2],以致全球气候发生改变^[3]。土壤碳库是陆地生态系统中最大的碳库,其碳储量约为生物碳库的 3.8 倍,大气碳库的 3 倍,其储量的变化对大气 CO₂ 浓度的改变有重要的调节作用^[4]。土壤碳包括土壤有机碳和无机碳两部分。土壤有机碳(SOC)主要来源于动植物残体、土壤微生物及其分泌物,在土壤中比较活跃,是土壤肥力的主要来源^[5]。土壤无机碳(SIC)是指土壤中的碳酸盐碳,是干旱区土壤碳的主要存在形式^[6]。草地是我国最大的陆地生态系统,由于人类不合理利用,我国 90% 的可利用草原呈现不同程度的退化,近 30 年来产草量下降 50%~70%^[7],由于生产力的降低,减少了碳向土壤的输入,同时,土壤理化特征的改变,促进了土壤原有碳素的释放^[8-9]。王明君等^[10]和高雪峰等^[11]研究发现,重度放牧导致荒漠草原退化,其土壤有机碳含量降低,草地土壤的呼吸作用加强,加速了土壤有机质的分解^[12]。王长庭等^[13]也发现,高寒草甸表层土壤有机碳含量减少幅度随退化程度的加剧而加强。可见,科学管理陆地生态系统,能显著降低土壤碳释放速率,有利于土壤碳固存。

贺兰山是我国西北干旱内陆地区重要的山地,也

是我国干旱与半干旱区的地理分界线,植被垂直地带性明显。自 20 世纪 50 年代开始,由于超载过牧及气候变化的综合影响,贺兰山西坡山前区域草地严重退化,草地生产力和植被盖度明显减少,土壤沙化严重,以短花针茅(*Stipa breviflora*)为建群种的草地中,红砂(*Reaumuria soongorica*)等灌木植物已开始大量入侵^[14-15],即海拔 2 100 m 处以短花针茅建群的草地出现海拔 1 800 m 处广为分布的灌木植物,也就是说沿海拔梯度,高海拔草地类型存在向临近低海拔草地类型转变的潜在风险,或者说低海拔草地类型有逐渐扩张到高海拔地区的趋势^[16],伴随草地群落的这一转变过程,草地土壤碳含量及碳库势必也发生变化。目前,关于贺兰山区域沿海拔梯度草地土壤碳分布及碳库变化特征还缺乏系统报道。另外,分析山地垂直地带谱上的土壤碳特征,计算高海拔草地土壤碳与临近低海拔碳的差值及变化程度,也为预测草地退化过程中土壤碳的变化方向提供了很好的参考,可以为草地的恢复管理和增汇减排提供科学依据。为此,本研究以贺兰山西坡山前 3 种主要草地类型为对象,研究了不同草地土壤有机碳、无机碳以及全碳的分布特征及其与气候、植被和土壤因素的关系,并计算高海拔草地土壤碳与临近海拔碳的差值,以期干旱区草地植被潜在

退化过程中的土壤碳损失风险及退化草地固碳潜力评估提供基础资料。

1 材料与方法

1.1 研究区自然概况

贺兰山位于阿拉善高原东部边缘,银川平原西侧,近南北走向,全长约 270 km,平均宽约 20 km,最高海拔 3 556 m,其中在阿拉善左旗境内约 90 km,典型大陆季风性气候,也是我国年降水量 200 mm 等水量线的重要分水岭。贺兰山体海拔高,相对高差大,其气候、植被和土壤类型沿海拔梯度具有明显的垂直地带性分布规律。本研究区域贺兰山西坡中段及其山前地带(105°32′—105°51′ E, 38°39′—39° 06′ N,海拔 2 100~1 360 m)地处阿拉善左旗,草地类型主要有山地草原、荒漠草原和草原化荒漠 3 类。

1.2 样地设置

沿贺兰山西坡,以海拔、植被特征为指标,选择短花针茅+冷蒿(*Artemisia frigida*)山地草原、短花针茅+无芒隐子草(*Cleistogenes songorica*)—珍珠(*Salsola passerina*)+红砂荒漠草原和红砂—无芒隐子草草原化荒漠,霸王(*Zygophyllum xanthoxylon*) + 驼绒藜(*Ceratoides latens*)—隐子草

草原化荒漠,在无人类干扰的区域植被均一的地段,设置调查样地,共计 6 个样地(表 1),用于植被调查和土壤样品采集。

1.3 样品采集与分析

样品采集:2013 年 8 月,在各样地内设置 5 个 50 m×50 m 的样区,每一样区设置一条 50 m 的固定样线,沿每一样线,以 10 m 间隔,设置一个样方,山地草原样方大小 1 m×1 m,荒漠草原和草原化荒漠样方大小为 5 m×5 m,在每个样方内收获现存草本植物,并剪取灌木新生枝条,计算植物地上生产力,65℃烘干称重,植物盖度采用针刺法。另外,每个样方内,用直径 5 cm 的土钻采集一个土样,每条样线上的样品充分混合为一个样本,取样深度为 0—10、10—20 和 20—40 cm 土层。土样自然风干后捡掉植物残体,分别过 2、0.5、0.25 mm 筛,用来测定土壤 pH、有机碳(SOC)、无机碳(SIC)、全氮(TN)、速效氮(AN)、全磷(P)、速效磷(AP)。另外,在每条样线中部,用环刀法取样测定相应土层土壤容重。

土壤样品室内分析:土壤有机碳用重铬酸钾氧化法测定;无机碳用气量法测定;土壤全碳(SOC)等于无机碳和有机碳之和;全氮用凯氏定氮法测定;速效氮用扩散吸收法测定;土壤全磷用三酸(硝酸:氢氟酸:高

表 1 各样地基本情况
Table 1 The basic information of different sites

海拔 Altitude/m	草地类型 Grassland type	群落类型 Community type	纬度 Latitude (N)	经度 Longitude (E)	年降水量 Precipitation/ mm	年均温 Mean annual temperature/℃	坡度 Slope
2 100	山地草原 Steppe	短花针茅(<i>Stipa breviflora</i>) + 冷蒿(<i>Artemisia frigida</i>)群落	38° 51′	105° 50′	280	4.9	3°~5°
1 960	山地草原 Steppe	短花针茅(<i>Stipa breviflora</i>) + 冷蒿(<i>Artemisia frigida</i>)群落	38° 52′	105° 48′	258	5.7	3°~5°
1 820	荒漠草原 Desert steppe	短花针茅(<i>Stipa breviflora</i>)—隐子草(<i>Cleistogenes songorica</i>) + 红砂(<i>Reaumuria soongorica</i>)群落	38° 52′	105°46′	234	6.5	3°~5°
1 700	荒漠草原 Desert steppe	短花针茅(<i>Stipa breviflora</i>)—隐子草(<i>Cleistogenes songorica</i>) + 红砂(<i>Reaumuria soongorica</i>)群落	38° 53′	105°44′	212	7.2	3°~5°
1 410	草原化荒漠 Steppe desert	红砂(<i>Reaumuria soongorica</i>)—隐子草(<i>Cleistogenes songorica</i>)群落	39° 01′	105° 39′	151	8.9	3°~5°
1 360	草原化荒漠 Steppe desert	霸王(<i>Zygophyllum xanthoxylon</i>) + 驼绒藜(<i>Ceratoides latens</i>)—隐子草(<i>Cleistogenes songorica</i>)群落	39° 05′	105°34′	140	9.2	1°~3°

氯酸=8:2:5)消解—钼锑抗比色法测定;速效磷用 0.5 mol·L⁻¹ NaHCO₃ 浸提—钼锑抗比色法测定;土壤 pH 测定水土比为 1:1,悬液用 pHs-3c 型酸度计测定,土壤容重用烘干法测定^[17]。

1.4 数据分析

土壤碳密度计算公式:

$$SOCD_i = SOC_i \times D_i \times B_i \times (1 - G) \times 10;$$

$$SICD_i = SIC_i \times D_i \times B_i \times (1 - G) \times 10;$$

$$STCD_i = STC_i \times D_i \times B_i \times (1 - G) \times 10。$$

式中: D_i 、 B_i 分别表示土层厚度 (cm)、土壤容重 ($g \cdot m^{-3}$), G 为 > 2 mm 的石砾所占的体积 (%); SOC_i 、 SIC_i 、 STC_i 分别为土壤有机碳、无机碳、全碳含量,单位为 $g \cdot kg^{-1}$;土壤碳密度单位为 $g \cdot m^{-2}$, i 代表土壤的分层数。

土壤碳含量损失量=高海拔处草地土壤碳含量—低海拔处草地土壤碳含量;

土壤碳含量损失率=(高海拔处草地土壤碳含量—低海拔处草地土壤碳含量)/高海拔处草地土壤碳含量×100%;

土壤碳密度损失量=高海拔处草地土壤碳密度—低海拔处草地土壤碳密度;

土壤碳密度损失率=(高海拔处草地土壤碳密度—低海拔处草地土壤碳密度)/高海拔处草地土壤碳密度×100%。

用 Microsoft office 2007 作图,用 SPSS 17.0 分析软件进行统计分析。采用 LSD 分析方法对各样地、土层间做单因素方差分析。偏相关分析和逐步回归分析土壤碳(无机碳、有机碳、全碳)与土壤理化特性(pH、容重、全氮、全磷、速效氮、速效磷)、气候因子(年均温和降水量)和植物特征(地上生产力和盖度)之间的关系,偏相关分析土壤碳密度与土壤碳含量及土壤容重的关系。

2 结果与分析

2.1 不同草地类型土壤碳含量

2.1.1 不同草地类型土壤碳含量特征 贺兰山西坡不同草地类型土壤有机碳含量在 0—10、10—20 和 20—40 cm 土层均随海拔的升高而逐渐增加,且各样地差异显著,其中各土层土壤有机碳含量均在 2 100 m 样地达最大值,在 1 360 m 样地最小;土壤有机碳含量在不同草地类型土壤中的变化顺序依次为山地草原>荒漠草原>草原化荒漠(图1)。土壤无机碳含量与土

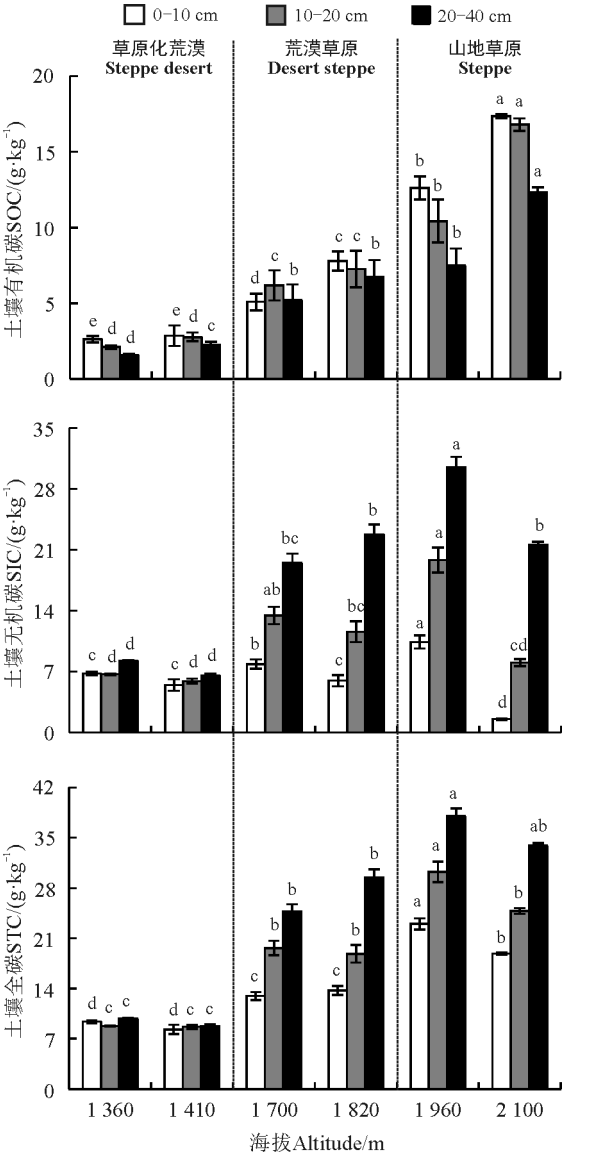


图 1 不同草地类型土壤碳含量

Fig. 1 The soil carbon content among different grassland types

注:不同小写字母表示同一土层不同海拔草地间存在显著差异 ($P < 0.05$)。图 2 同。

Note: Different lowercase letters in the same soil layer among different grassland types indicated significant difference at the 0.05 level; similarly for Fig. 2.

壤有机碳的变化趋势不同(图 1),从 1 360 m 样地到 1 960 m 样地,土壤无机碳含量随海拔的升高而升高,3 个土层土壤无机碳含量均表现增加趋势,到 2 100 m 样地无机碳含量迅速下降,各土层土壤无机碳含量均在 1 960 m 样地达最大值;土壤无机碳含量在不同草地类型中表现为山地草原>荒漠草原>草原化荒漠。土壤全碳含量随海拔的增加而升高(图 1),且各土层土壤全碳含量均表现为增加趋势,而到 2 100 m 样地明显降低;土壤全碳在不同类型草地土壤中的变化顺

序依次为山地草原>荒漠草原>草原化荒漠。

2.1.2 气候、植被和土壤因子与土壤碳的相互关系
对土壤碳含量与土壤理化性质、植被盖度和生物量及年降水量和年均温进行偏相关分析(表 2),结果表明,0—10 和 20—40 cm 土层土壤有机碳与土壤全氮含量显著正相关($P<0.05$)。0—10 cm 土层土壤无机碳和全碳与年降水量、年均温、土壤全氮显著正相关($P<0.05$),10—20 cm 土壤无机碳和全碳与土壤 pH 显著负相关,20—40 cm 土壤无机碳与年降水量、年均温显著正相关,与土壤容重、全磷显著负相关($P<0.05$)。

将所有相关因子与土壤碳进行逐步回归分析(表 3),结果表明,在 0—10 cm 土层,土壤有机碳含量与土壤全氮(TN)和速效氮(AN)显著相关,土壤无机碳与速效磷(AP)显著相关,土壤全碳与土壤全氮、全磷(TP)和速效磷显著相关。在 10—20 cm 土层,土壤有机碳与土壤全氮显著相关,土壤无机碳与土壤容重

(B)、土壤 pH 和速效氮显著相关,土壤全碳与土壤容重显著相关。在 20—40 cm 土层,土壤有机碳与土壤全氮和土壤 pH 显著相关,土壤无机碳与年均温(T)、年降水量(R)、土壤容重和全磷显著相关,土壤全碳与土壤容重显著相关。

2.2 不同草地类型土壤碳密度特征

2.2.1 不同草地类型土壤碳密度特征 土壤有机碳密度在贺兰山西坡山前地带的变化趋势与有机碳含量的变化趋势相似(图 2),即随海拔增加,各土层土壤有机碳密度均呈现逐渐增加趋势,样地间差异显著($P<0.05$),其中 2 100 m 样地土壤有机碳密度最大,1 360 m 样地土壤有机碳密度最小;就草地类型而言,土壤有机碳密度表现为山地草原>荒漠草原>草原化荒漠。土壤无机碳密度的变化趋势从 1 360 到 1 960 m,随海拔的增加,土壤无机碳密度表现为增加趋势,到 1 960 m 样地达最大值(图 2)。不同草地类型土壤无

表 2 土壤碳含量与土壤、植被及气候因素的偏相关性

项目 Item	有机碳 Soil organic carbon			无机碳 Soil inorganic carbon			全碳 Soil total carbon		
	0—10 cm	10—20 cm	20—40 cm	0—10 cm	10—20 cm	20—40 cm	0—10 cm	10—20 cm	20—40 cm
年降水量 Precipitation	−0.142	−0.241	−0.271	0.586 *	0.271	0.546 *	0.501 *	0.229	0.487 *
年均温 Mean annual temperature	−0.159	−0.221	−0.293	0.586 *	0.203	0.440 *	0.497 *	0.155	0.370
盖度 Plant cover	0.035	0.169	−0.026	0.112	−0.013	0.096	0.111	0.047	0.086
生产力 Plant productivity	−0.010	0.006	0.342	0.241	−0.190	−0.164	0.209	−0.216	−0.078
土壤 pH Soil pH	−0.037	0.304	0.390	0.042	−0.511 *	−0.199	0.023	−0.496 *	−0.100
土壤容重 Soil bulk density	−0.181	−0.093	0.215	−0.216	−0.294	−0.511 *	−0.254	−0.363	−0.458 *
全氮 Total nitrogen	0.431 *	0.363	0.670 *	0.557 *	−0.160	−0.224	0.609 *	−0.047	−0.021
速效氮 Available nitrogen	0.163	0.044	−0.381	0.018	−0.271	−0.133	0.077	−0.295	−0.212
速效磷 Available phosphorus	0.179	−0.166	−0.178	−0.131	0.167	0.033	−0.048	0.134	−0.009
全磷 Total phosphorous	−0.070	−0.004	0.214	−0.185	−0.322	−0.423 *	−0.188	−0.367	−0.367

注:“*”表示 $P<0.05$, 表 4 同。
Note:“*” indicated $P<0.05$, similarly for Table 4.

表 3 土壤碳含量与土壤、植被及气候因素的回归方程

Table 3 Regression equation of soil carbon content and soil, vegetation and climate factors

项目 Item	土层 Soil layer/cm	回归方程 Regression equation
有机碳 Soil organic carbon	0—10	$Y_{SOC}=4.607TN+0.068AN-0.663(R^2=0.981,P<0.001)$
	10—20	$Y_{SOC}=5.293TN-0.389(R^2=0.937,P<0.001)$
	20—40	$Y_{SOC}=5.797TN+1.926\text{ pH}-17.263(R^2=0.942,P<0.001)$
无机碳 Soil inorganic carbon	0—10	$Y_{SIC}=12.127-2.105AP(R^2=0.511,P<0.01)$
	10—20	$Y_{SIC}=206.805-56.572B-0.396AN-13.139\text{pH}(R^2=0.584,P<0.01)$
	20—40	$Y_{SIC}=44.095R+1.473T-55.352TP-70.941B-486.235(R^2=0.840,P<0.01)$
全碳 Soil total carbon	0—10	$Y_{STC}=7.082+9.163TP+4.369TN-1.487AP(R^2=0.889,P<0.001)$
	10—20	$Y_{STC}=88.615-53.408B(R^2=0.760,P<0.01)$
	20—40	$Y_{STC}=129.638-79.072B(R^2=0.738,P<0.01)$

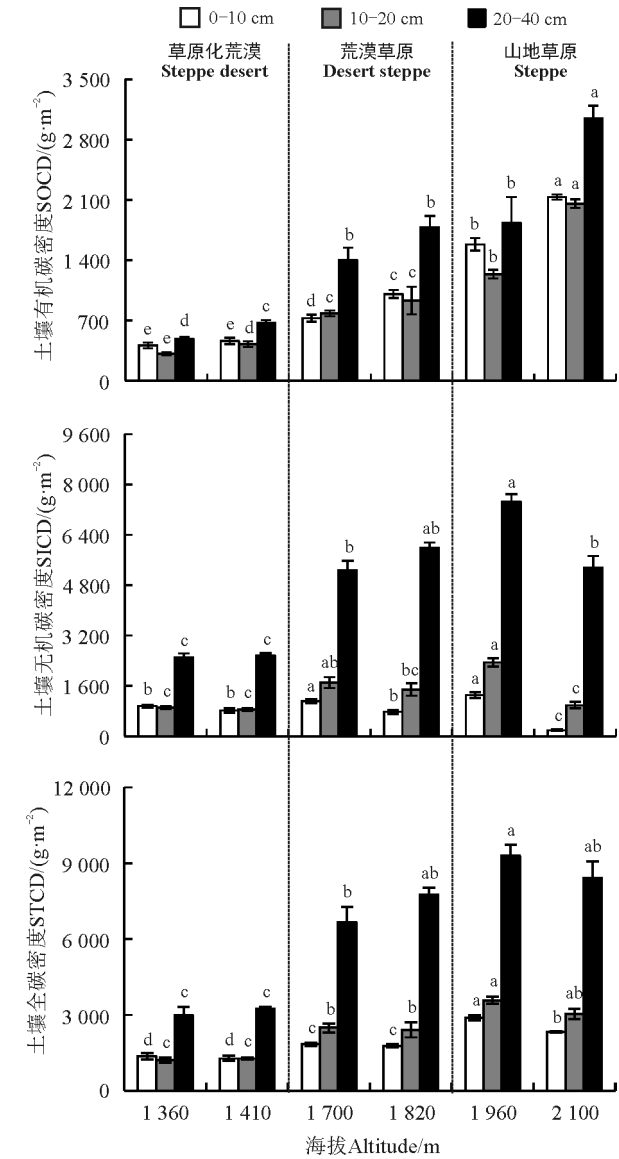


图 2 不同草地类型土壤碳密度

Fig. 2 The soil carbon density among different grassland types

机碳密度表现为山地草原>荒漠草原>草原化荒漠。土壤全碳密度变化与土壤碳含量变化趋势表现相似,即随海拔高度的增加,各样地土壤碳密度均表现为增加趋势,到 2 100 m 样地明显降低,小于 1 960 m 样地,但大于其他样地土壤碳密度(图 2);土壤全碳密度在 3 种草地类型间的变化为山地草原>荒漠草原>草原化荒漠。

2.2.2 土壤碳密度与土壤碳含量和土壤容重的相关性 对土壤碳密度与土壤碳含量及土壤容重进行偏相关分析,结果表明,0—10、10—20 和 20—40 cm 土层土壤有机碳密度与有机碳含量、无机碳密度与无机碳含量以及全碳密度和全碳含量均显著正相关($P<0.05$),各碳密度与土壤容重的相关性除 20—40 cm 土层有机碳密度和全碳密度与土壤容重无显著相关外,其他均显著相关($P<0.05$)(表 4)。可见,碳密度与碳含量和容重均显著相关,但碳含量对碳密度贡献相对要大。

2.3 草地植被潜在退化过程中土壤碳损失分析

2.3.1 土壤碳含量损失分析 通过计算高海拔草地土壤碳与临近海拔碳的差值,分析山地垂直地带谱上的土壤碳特征,评估草地植被潜在退化过程中的碳损失风险(表 5),发现在草地植被潜在退化过程中(海拔 2 100 m→1 960 m→1 820 m→1 700 m→1 410 m→1 360 m)土壤有机碳含量在 3 个土层均存在一定程度的损失,损失量变化范围为 0.23~6.36 g·kg⁻¹,损失率最低为 7.98%,最高达 56.82%。海拔 2 100 m 草地状况退化为海拔 1 960 m 的草地草地状况时有机碳含量损失量的风险最大,而海拔 1 700 m 草地状况退化为海拔 1 410 m 草地状况时有机碳含量损失率风险

表 4 土壤碳密度与土壤碳含量和容重的偏相关系数

Table 4 Partial correlation coefficient between soil carbon density, soil carbon content and soil bulk density				
土层 Soil layer/cm	项目 Item	有机碳密度 Soil organic carbon density	无机碳密度 Soil inorganic carbon density	全碳密度 Total carbon density
0—10	对应碳含量 Soil carbon content	0.993 *	0.984 *	0.976 *
	土壤容重 Soil bulk density	0.491 *	0.656 *	0.559 *
10—20	对应碳含量 Soil carbon content	0.997 *	0.997 *	0.989 *
	土壤容重 Soil bulk density	0.722 *	0.773 *	0.619 *
20—40	对应碳含量 Soil carbon content	0.975 *	0.994 *	0.907 *
	土壤容重 Soil bulk density	0.117	0.724 *	−0.205

表 5 草地退化演替过程中土壤碳含量损失分析

Table 5 Analysis of soil carbon content loss rate among different grassland degradation succession								
现状 (海拔) Current situation (altitude)	潜在退化状 态(海拔) Potential degradation situation (altitude)	土层 Soil layer/ cm	有机碳 Soil organic carbon		无机碳 Soil inorganic carbon		全碳 Soil total carbon	
			损失量	损失率	损失量	损失率	损失量	损失率
			Loss content/ (g · kg ^{−1})	Loss rate/ %	Loss content/ (g · kg ^{−1})	Loss rate/ %	Loss content/ (g · kg ^{−1})	Loss rate/ %
2 100 m	1 960 m	0—10	4.74	27.31	−8.89	−589.07	−4.16	−22.05
		10—20	6.36	37.90	−11.77	−146.40	−5.41	−21.79
		20—40	4.86	39.41	−8.91	−41.26	−4.05	−11.94
1 960 m	1 820 m	0—10	4.81	38.17	4.47	42.93	9.28	40.32
		10—20	3.17	30.36	8.23	41.55	11.40	37.69
		20—40	0.74	9.93	7.76	25.41	8.50	22.36
1 820 m	1 700 m	0—10	2.71	34.72	−1.92	−32.41	0.78	5.69
		10—20	1.07	14.79	−1.87	−16.18	−0.80	−4.24
		20—40	1.53	22.78	3.26	14.31	4.79	16.24
1 700 m	1 410 m	0—10	2.23	43.88	3.42	30.79	5.65	35.93
		10—20	3.41	55.19	8.55	56.15	11.97	55.85
		20—40	2.95	56.82	12.97	66.47	15.92	64.44
1 410 m	1 360 m	0—10	0.23	7.98	−1.33	−24.40	−1.10	−13.25
		10—20	0.66	23.97	−0.77	−12.99	−0.10	−1.15
		20—40	0.66	29.35	−1.68	−25.62	−1.02	−11.56

最大;土壤无机碳含量在各草地潜在退化过程中的表现并不相同,在同一草地类型中,草地植被状况由海拔 2 100 m 的状态退化为海拔 1 960 m 状态,海拔 1 820 m 的状态退化为海拔 1 700 m 状态,及海拔 1 410 m 的状态退化为海拔 1 360 m 状态中土壤无机碳含量表现为增加趋势,而不同草地类型间的草地状况的改变过程中,无机碳含量均表现降低趋势,其最大损失率为 66.47%,发生在海拔 1 700 m 处(荒漠草原)的草地状态潜在转变为海拔 1 410 m 处(草原化荒漠)的状态;土壤全碳含量

在草地植被状况由海拔 2 100 m 的状态退化为海拔 1 960 m 状态,及海拔 1 410 m 的状态退化为海拔 1 360 m 状态中表现为增加趋势,其余海拔处草地潜在退化过程中均表现为减少趋势,损失量变化范围为 0.78~15.92 g · kg^{−1},损失率为 5.69%~64.44%。

2.3.2 土壤碳密度损失分析 草地植被潜在退化过程中,0—40 cm 土层土壤碳密度损失状况显示(表 6),土壤有机碳密度在各草地植被潜在转变过程中均明显减少,损失量范围为 353~2 578 g · m^{−2},损失率为

20%~46%,其中,草地植被状况由海拔 2 100 m 的状态退化为海拔 1 960 m 状态中有机碳密度损失量最大,而海拔 1 700 m 草地状况退化为海拔 1 410 m 草地状况时有机碳密度损失率最大。土壤无机碳密度在草地植被状况由海拔 2 100 m 的状态退化为海拔 1 960 m 状态,及海拔 1 410 m 的状态退化为海拔 1 360 m 状态中表现为增加趋势,其余海拔处草地潜在退化过程中均表现为减少趋势,最大损失量和损失率分别为 3 853 g·m⁻²和 48%。土壤全碳密度在草地植被状况由海拔 2 100 m 的状态退化为海拔 1 960

m 状态时也表现为增加趋势,其余海拔处草地潜在退化过程中均表现为减少趋势,最大损失量和损失率分别为 5 199 g·m⁻²和 47%,发生在海拔 1 700 m 处(荒漠草原)的草地状态潜在转变为海拔 1 410 m 处(草原化荒漠)的状态。整体看来,沿海拔的各种退化演替过程,土壤有机碳均表现退化状态,无机碳变化各异,但当山地草原退化为荒漠草原(1 960 m→1 820 m)或荒漠草原退化为草原化荒漠(1 700 m→1 410 m)时,土壤无机碳和全碳密度均明显降低,表明当草地类型发生变化时,土壤无机碳和全碳损失较严重。

表 6 草地退化演替过程中土壤碳密度损失率分析
Table 6 Analysis of soil carbon density loss rate among different grassland degradation succession

现状 (海拔) Current situation (altitude)	潜在退化状 态(海拔) Potential degradation situation (altitude)	土层 Soil layer/ cm	有机碳		无机碳		全碳	
			Soil organic carbon		Soil inorganic carbon		Soil total carbon	
			损失量 Loss content/ (g·m ⁻²)	损失率 Loss rate/ %	损失量 Loss content/ (g·m ⁻²)	损失率 Loss rate/ %	损失量 Loss content/ (g·m ⁻²)	损失率 Loss rate/ %
2 100	1 960	0—40	2 578	36	—4 581	—70	—2 002	—15
1 960	1 820	0—40	941	20	2 867	26	3 808	24
1 820	1 700	0—40	811	22	155	2	965	8
1 700	1 410	0—40	1 346	46	3 853	48	5 199	47
1 410	1 360	0—40	353	23	—137	—3	217	4

3 讨论与结论

3.1 不同草地类型土壤碳特征

土壤碳包括土壤有机碳和无机碳两部分。土壤有机碳是土壤有机物质的输入与损失之间的平衡,在不同的生态环境和人类利用方式下,土壤有机碳存在很大的差异。一般来说,山地生态系统土壤有机碳密度具有垂直地带性,高海拔地区有机碳密度高,低海拔地区相对较低,土壤有机碳密度与海拔呈正相关关系^[18-20]。就不同草地类型而言,有研究指出土壤有机碳在草地类型的分布表现为草甸草原>典型草原>荒漠草原^[21-22]。本研究贺兰山西坡主要草地类型土壤有机碳的分布状况与上述研究结果一致,表现为随海拔上升,土壤有机碳含量和密度逐渐增加,整个样带的土壤有机碳含量和密度按草地类型可排列为山地草原>荒漠草原>草原化荒漠。分析认为,在低海拔地区,温度高、降水量少,植被盖度和生产力低,凋落物极少,土壤有机碳含量很低;随海拔的上升,降水量逐渐增加,气候变湿润,草地类型依次为草原化荒漠、荒漠草原和山地草原,草地植被的生长状况越来越好,系统凋落物增多,土壤有机碳含量增加。此外,随海拔增加,温度

逐渐降低,土壤有机质分解减缓也是有机碳较高的主要原因之一^[23-24]。土壤无机碳是土壤碳的重要组成部分^[6],受气候变化与人类活动的影响。Mi 等^[25]指出,无机碳随着温度的降低而增加,降水量的增加而减少。在本研究地区,随着海拔的上升,贺兰山西坡降水量逐渐增加,温度逐渐降低,按 Mi 等^[25]的研究结果降水量和温度对该地区土壤碳具有相反的作用,而本研究结果显示土壤无机碳含量和密度随海拔的上升先逐渐增加,到海拔 2 100 m 样地有所减少,草地类型表现为山地草原>荒漠草原>草原化荒漠。分析认为,土壤无机碳一般与土壤母质的发育状态有关,在生态系统中变化比较缓慢,该地区随着海拔的升高,土壤无机碳的分布特点可能与土壤母质的发育程度有关。降水量和温度是影响土壤发育的重要因素,在海拔 2 100 m 样地处,表层土壤无机碳含量和密度较低,可能是该草地植被盖度和生物量高,表层土壤发育状况较好,有机物质富集,有机碳含量高,无机碳较低,而随着土层的下降,无机碳迅速增加,可能是强烈的淋溶作用,土壤盐基离子在下层土壤积累,致使无机碳含量显著增加。土壤全碳的变化趋势与土壤无机碳的变化结果相似,

即随海拔的增加土壤全碳先逐渐增加,到2 100 m 样地略有减少,是因为该地区土壤无机碳含量和密度大于有机碳含量和密度,主要受土壤无机碳的含量影响。就植被类型而言,土壤全碳含量整体表现为山地草原>荒漠草原>草原化荒漠。本研究中,土壤碳密度与土壤碳含量及土壤容重进行偏相关分析表明,土壤碳密度与碳含量和容重均存在显著相关性,但碳含量对碳密度贡献相对要大,因此,土壤碳密度在贺兰山西坡山前地带的变化趋势与碳含量的变化一致,就草地类型而言,土壤碳密度表现为山地草原>荒漠草原>草原化荒漠。

3.2 气候、植被和土壤因子与土壤碳的相互关系分析

土壤有机碳是评价土壤肥力大小的指标,受气候、植被、土壤以及人类活动的综合影响。孙慧兰等^[20]研究发现,土壤有机碳与土壤 pH 存在相关,与土壤含水量、全氮全磷显著正相关。范永刚等^[26]研究指出,影响土壤有机碳的因素很多,在巴音布鲁克草地土壤含水量、土壤紧实度、植被生产力和空气相对湿度是影响 SOC 含量的主要因素。本研究表明,该地区土壤有机碳与土壤全氮相关性最为显著,原因在于土壤有机碳主要来源于动植物残体、微生物分泌物以及土壤腐殖质,土壤氮主要来源于植物残体的输入和生物固氮,两者之间存在紧密的联系。有关土壤无机碳含量的影响因素报道极少。Mi 等^[25]研究指出,无机碳含量随着温度的降低而增加,降水量的增加而减少。祖元刚等^[27]研究表明土壤无机碳与 TN、TP、AN、AP 显著负相关,与土壤 pH 值、容重显著负相关。本研究表明,影响土壤无机碳的因素主要为年降水量和年均温,与土壤 pH 和容重相关性显著。整体看来,本研究发现影响有机碳和无机碳含量的因素不同,从有机碳和无机碳产生的过程分析,土壤有机碳和无机碳的影响因素会存在很大区别,土壤有机碳的来源主要是系统凋落物分解进入土壤中,因此与植被盖度和生物量存在明显的相关性,但土壤无机碳主要来自母质的发育,其变化多与气候条件和土壤理化性质有关。

3.3 草地潜在退化过程中土壤碳损失分析

20 世纪 60 年代以后,贺兰山地区人口不断增

加,人为的不合理开发,过度的放牧、采伐和开矿,严重破坏了当地的生态环境和荒漠草地植被群落结构^[28],加上原本就恶劣的生态环境,该地区草地存在严重退化现象。同时,随着全球气候变暖,植被海拔梯度具有上移的趋势,在本研究区域,已有研究发现以短花针茅建群的草地中,红砂等灌木植物已开始大量入侵。采用空间代替时间的思路,通过计算高海拔草地土壤碳与临近海拔碳的差值,分析山地垂直地带谱上的土壤碳特征,能够很好地判定伴随自然和人为原因引起的植被潜在退化过程中的碳损失风险,这对研究土壤碳循环具有重要的指导意义,可以帮助预测草地退化状态下土壤碳的损失情况,同时也可以作为退化草地恢复过程其固碳潜力的推测,为当地草地的恢复管理提供了科学依据。分析结果表明,在草地植被潜在退化过程中(海拔 2 100 m→1 960 m→1 820 m→1 700 m→1 410 m→1 360 m)土壤有机碳含量和密度均明显减少,损失量和损失率很大,有机碳含量最高损失量 $6.36 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,损失率最高达 57%;土壤无机碳和全碳的含量和密度随退化过程的不同表现不同,当草地类型发生潜在退化演替时(山地草原→荒漠草原,荒漠草原→草原化荒漠,即 1 960 m→1 820 m 和 1 700 m→1 410 m),土壤无机碳和全碳均明显减少,变化幅度大,土壤有机碳和无机碳的损失率相近;而在同一草地类型下不同植被群落类型发生退化演替时(1 820 m→1 700 m, 1 410 m→1 360 m),无机碳和全碳变化相对复杂,甚至部分土层表现增加趋势;而海拔 2 100 m 草地状况向海拔 1 960 m 草地潜在退化过程中土壤无机碳显著增加,可能与样地土壤母质的发育状态有关。另外,同个草地类型内的两个海拔的草地由于海拔落差小,其土壤碳的差异相比不同草地类型间的草地土壤碳的差异小,而草地类型间的变化使得草地土壤碳存在较大的差异,一定程度上反映了土壤成土过程的不同。综上分析可以看出,草地退化过程中对土壤有机碳和无机碳均存在显著影响,对土壤有机碳的影响可能主要是来源于有机质的输入,当草地发生退化时,植被盖度和生物量明显减少,有机碳逐渐下降,土壤肥力降低。

参考文献 References:

- [1] 汪业勋,赵士洞.陆地土壤碳循环的研究动态.生态学杂志,1999,18(5):29-35.
Wang Y X,Zhao S D.Research state of soil carbon cycling in terrestrial ecosystem.Chinese Journal of Ecology,1999,18(5):29-35.(in Chinese)

- [2] Schlesinger W H, Bruijnzeel L A, Bush M B, Klein E M, Mace K A, Raikes J A, Whittaker R J. The biogeochemistry of phosphorus after the first century of soil development on Rakata Island, Krakatau, Indonesia. *Biogeochemistry*, 1998, 40(1): 37-55.
- [3] Hobbs S E. Climate change, the IPCC scientific assessment. *Journal of Atmospheric & Terrestrial Physics*, 1992, 54(11-12): 619-621.
- [4] 洪江涛, 吴建波, 王小丹. 放牧和围封对藏北高寒草原紫花针茅群落生物量分配及碳、氮、磷储量的影响. *草业科学*, 2015, 32(11): 1878-1886.
- Hong J T, Wu J B, Wang X D. Effects of grazing and fencing on *Stipa purpurea* community biomass allocation and carbon, nitrogen and phosphorus pools on the northern Tibet Plateau alpine. *Pratacultural Science*, 2015, 32(11): 1878-1886. (in Chinese)
- [5] Oades J M. The retention of organic matter in soils. *Biogeochemistry*, 1988, 5(1): 35-70.
- [6] 翁金桃. 碳酸盐岩在全球碳循环过程中的作用. *地球科学进展*, 1995, 10(2): 154-158.
- Weng J T. The effect of carbonate rocks on global carbon cycle. *Advence in Earth Sciences*, 1995, 10(2): 154-158. (in Chinese)
- [7] 李毓堂. 草地资源优化管理开发与 21 世纪中国可持续发展战略: 兼评中国科学院关于中国可持续发展战略的两个报告. *草业科学*, 2002, 19(1): 11-15.
- Li Y T. Optimum management and development of grassland resources and chinese strategy for sustainable development in the 21st century: Concurrently on two reports by Chinese Academy of Sciences on China's strategy for sustainable development. *Pratacultural Science*, 2002, 19(1): 11-15. (in Chinese)
- [8] Niu D, Hall S, Fu H, Kang J, Qin Y, Elser J. Grazing exclusion alters ecosystem carbon pools in Alxa desert steppe. *New Zealand Journal of Agricultural Research*, 2011, 54(3): 127-142.
- [9] 钟华平, 樊江文, 于贵瑞, 韩彬. 草地生态系统碳蓄积的研究进展. *草业科学*, 2005, 22(1): 4-11.
- Zhong H P, Fan J W, Yu G R, Han B. The research progress of carbon storage in grassland ecosystem. *Pratacultural Science*, 2005, 22(1): 4-11. (in Chinese)
- [10] 王明君, 韩国栋, 赵萌莉, 陈海军, 王珍, 郝晓莉, 薄涛. 草甸草原不同放牧强度对土壤有机碳含量的影响. *草业科学*, 2007, 24(10): 6-10.
- Wang M J, Han G D, Zhao M L, Chen H J, Wang Z, Hao X L, Bo T. The effect of different grazing intensity on soil organic carbon content in meadow steppe. *Pratacultural Science*, 2007, 24(10): 6-10. (in Chinese)
- [11] 高雪峰, 韩国栋, 张功, 赵萌莉, 卢萍. 荒漠草原不同放牧强度下土壤酶活性及养分含量的动态研究. *草业科学*, 2007, 24(2): 10-13.
- Gao X F, Han G D, Zhang G, Zhao M L, Lu P. Study on dynamics of soil enzyme activity and nutrient of desert steppe under different grazing intensities. *Pratacultural Science*, 2007, 24(2): 10-13. (in Chinese)
- [12] 郭雅蓉, 侯扶江, 于应文. 祁连山北坡 3 个季节性牧场夏季的土壤呼吸. *草业科学*, 2017, 34(8): 1561-1570.
- Guo Y R, Hou F J, Yu Y W. Soil respiration in three types of seasonal pastures in summer on the northern slope of Qilian Mountains. *Pratacultural Science*, 2017, 34(8): 1561-1570. (in Chinese)
- [13] 王长庭, 龙瑞军, 王启兰, 曹广民, 施建军, 杜岩功. 放牧扰动下高寒草甸植物多样性、生产力对土壤养分条件变化的响应. *生态学报*, 2008, 28(9): 4144-4152.
- Wang C T, Long R J, Wang Q L, Cao G M, Shi J J, Du Y G. Response of plant diversity and productivity to soil resource changing under grazing disturbance on an alpine meadow. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28(9): 4144-4152. (in Chinese)
- [14] 汪一鸣. 1000 年来贺兰山地区生物多样性及其环境的变化. *宁夏大学学报(自然版)*, 2000, 21(3): 260-264.
- Wang Y M. Biodiversification and its environment changes in Helan Mountains area since A.D. 1000. *Journal of Ningxia University(Natural Science Edition)*, 2000, 21(3): 260-264. (in Chinese)
- [15] 梁存柱, 朱宗元, 王炜, 裴浩, 张韬, 王永利. 贺兰山植物群落类型多样性及其空间分异. *植物生态学报*, 2004, 28(3): 361-368.
- Liang C Z, Zhu Z Y, Wang W, Pei H, Zhang T, Wang Y L. The diversity and spatial distribution of plant communities in the Helan Mountains. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2004, 28(3): 361-368. (in Chinese)
- [16] 马国飞, 满苏尔·沙比提, 张雪琪, 托木尔峰南坡不同植被类型土壤特性及其与海拔的关系. *草业科学*, 2017, 34(6): 1149-1158.
- Ma G F, Mansur·Sabit, Zhang X Q. Relationship between soil properties in different vegetation types and altitudes on the south slope of Mt. Tuomuer. *Pratacultural Science*, 2017, 34(6): 1149-1158. (in Chinese)
- [17] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法. 北京: 中国农业科技出版社, 2000.
- Lu R K. *Soil Agrochemistry Analysis Method*. Beijing: Agriculture Science and Technology Press, 2000. (in Chinese)

- [18] 解宪丽,孙波,周慧珍,李忠佩.不同植被下中国土壤有机碳的储量与影响因子.土壤学报,2004,41(5):687-699.
Xie X L,Sun B,Zhou H Z,Li Z P.Soil carbon stocks and their influencing factors under native vegetations in China,Acta Pedologica Sinica,2004,41(5):687-699.(in Chinese)
- [19] 徐侠,陈月琴,汪家社,方燕鸿,权伟,阮宏华,徐自坤.武夷山不同海拔高度土壤活性有机碳变化.应用生态学报,2008,19(3):539-544.
Xu X,Chen Y Q,Wang J S,Fang Y H,Quan W,Ruan H H,Xu Z K.Variations of soil labile organic carbon along an altitude gradient in Wuyi Mountain,Chinese Journal of Applied Ecology,2008,19(3):539-544.(in Chinese)
- [20] 孙慧兰,李卫红,杨余辉,杨玉海.伊犁山地不同海拔土壤有机碳的分布.地理科学,2012,32(5):603-608.
Sun H L,Li W H,Yang Y H,Yang Y H.Soil organic carbon changing with altitudes on the Ili Mountainous region,Scientia Geographica Sinica,2012,32(5):603-608.(in Chinese)
- [21] 王艳芬,陈佐忠,Tieszen L T.人类活动对锡林郭勒地区主要草原土壤有机碳分布的影响.植物生态学报,1998,22(6):545-551.
Wang Y F,Chen Z Z,Tieszen L T.Distribution of soil organic carbon in the major grasslands of Xilinguole,Inner Mongolia,China,Chinese Journal of Plant Ecology,1988,22(6):545-551.(in Chinese)
- [22] 刘伟,程积民,陈芙蓉,高阳.黄土高原中部草地土壤有机碳密度特征及碳储量.草地学报,2011,19(3):425-431.
Liu W,Cheng J M,Chen F R,Gao Y.Characteristic of organia carbon density and organiccarbon storage in the natural grassland of center Loess Plateau.Acta Agrestia Sinica,2011,19(3):425-431.(in Chinese)
- [23] Post W M,Izaurrealde R C,Mann L K,Bliss N.Monitoring and verifying changes in organic carbon in soil,Chimate Change,2001,51(1):73-99.
- [24] 程先富,史学正,于东升,潘贤章.兴国县森林土壤有机碳库及其与环境因子的关系.地理研究,2004,23(2):211-217.
Cheng X F,Shi X Z,Yu D S,Pan X Z.Organic carbon pool of forest soil and its relationship toenvironment factors in Xingguo country of Jiangxi Province,Geographical Research,2004,23(2):211-217.(in Chinese)
- [25] Mi N,Shaoqiang,Liu J,Yu G,Zhang W,Jobbcgy E.Soil inorganic carbon storage pattern in China.Global Change Biology,2008,14(10):2380-2387.
- [26] 范永刚,胡玉昆,李凯辉,肖燕.巴音布鲁克主要草地类型表层土壤有机碳特征及其影响因素的研究.干旱区资源与环境,2008,22(8):179-184.
Fan Y G,Hu Y K,Li K H,Xiao Y.Organic carbon content in major grassland types in Bayinbulak,Journal of Arid Land Resources and Environment,2008,22(8):179-184.(in Chinese)
- [27] 祖元刚,李冉,王文杰,苏冬雪,王莹,邱岭.我国东北土壤有机碳、无机碳含量与土壤理化性质的相关性.生态学报,2011,31(18):5207-5216.
Zu Y Z,Li R,Wang W J,Su D X,Wang Y,Qiu L.Soil organic and inorganic carbon contents in relation to soil physicochemical properties in northeastern China,Acta Ecologica Sinica,2011,31(18):5207-5216.(in Chinese)
- [28] 张小芬,陈士超,孙萍.贺兰山自然保护区实施围封转移的生态发展战略分析.内蒙古农业大学学报(自然科学版),2005,26(3):17-20.
Zhang X F,Chen S C,Sun P.Analysis on the ecological development strategy of enclosingang transforming in Helan Mountain Natural Preserve,Journal of Inner Mongolia Agricultural University(Natura Science Edition),2005,26(3):17-20.(in Chinese)

(责任编辑 武艳培)