

# 青藏高原典型高寒草甸区土壤有机碳氮的变异特性

李元寿<sup>1,2</sup>, 张人禾<sup>1</sup>, 王根绪<sup>3</sup>, 赵林<sup>2</sup>, 丁永建<sup>2</sup>, 王一博<sup>4</sup>

(1. 中国气象科学研究院, 北京 100081; 2. 中国科学院青藏高原冰冻圈观测研究站, 兰州 730000; 3. 中国科学院成都山地灾害与环境研究所, 成都 610041; 4. 兰州大学资源与环境学院, 兰州 730000)

**摘要:**本研究应用地统计学的基本原理与方法(半方差分析)对青藏高原典型高寒草甸区 0~10 cm 土壤有机碳和全氮空间变异性进行了分析. 结果表明, 0~10 cm 的土壤有机碳和全氮的平均含量分别为 11.45 g·kg<sup>-1</sup> 和 1.02 g·kg<sup>-1</sup>, 平均变异系数分别为 0.23 和 0.21, 反映出该植被区土壤肥力较为贫瘠. 土壤有机碳和全氮随机因素的变异占总空间异质性变异的比率分别为 44.7% 和 49.9%, 变异尺度分别为 210.9 m 和 200.1 m, 随机因素的影响主要发生在采样尺度 < 10 m 的范围之内. 在该研究区域上土壤有机碳和全氮均表现出空间自相关因素大于随机因素的变异格局; 在空间结构的变异上, 由土壤内在属性如土壤矿物质、地形等空间自相关因素和人为因素如放牧及工程施工等对土壤表层的践踏引起的随机因素共同起作用, 影响程度呈中等水平.

**关键词:** 高寒草甸; 土壤有机碳; 全氮; 空间异质性; 青藏高原

中图分类号: X144 文献标识码: A 文章编号: 0253-3301(2009)06-1826-06

## Spatial Variability Characteristics of Soil Organic Carbon and Nitrogen Reveal Typical Alpine Meadow Degradation on Qinghai-Tibetan Plateau

LI Yuan-shou<sup>1,2</sup>, ZHANG Ren-he<sup>1</sup>, WANG Gen-xu<sup>3</sup>, ZHAO Lin<sup>2</sup>, DING Yong-jian<sup>2</sup>, WANG Yi-bo<sup>4</sup>

(1. Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081, China; 2. Cryosphere Research Station on Qinghai-Xizang Plateau, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China; 3. Institute of Mountain Hazard and Environment, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610041, China; 4. College of Resources and Environment, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China)

**Abstract:** The principle of geo-statistics method was used to analyse the spatial heterogeneity of soil organic carbon and total nitrogen (0-10 cm) of alpine meadow of the Qinghai-Tibetan Plateau. The results show that the mean contents of soil organic carbon and total nitrogen at depth 0-10 cm are 11.45 g·kg<sup>-1</sup> and 1.02 g·kg<sup>-1</sup>, 0.23 and 0.21 of co-variation coefficient, respectively. As mentioned above all factors reflect oligotrophic condition of soil fertility at this habitat. Organic carbon and entire nitrogen of soil random factor dissociation take up mutant proportion of general space heterogeneity being 44.7% and 49.9% respectively. Mutant dimension is 210.9 m and 200.1 m respectively. The soil organic carbon and the entire nitrogen show on the research territory vacates to oneself the factor to be bigger than machine the factor the different pattern. On space structure dissociation, from inherent attribute of soil, if space such as soil mineral substance, landform is certainly relevance, the factor and the artificial factor play role if the random factors that be trampled on to soil super crust arouses such as grazing and engineering construction is common, Medium memorial level affecting degree.

**Key words:** alpine meadow; soil organic carbon; total nitrogen; spatial heterogeneity; Qinghai-Tibetan Plateau

在陆地生态环境系统中, 土壤有机碳和氮在全球碳氮循环中起着重要作用<sup>[1,2]</sup>. 土壤有机碳库及其排放, 对大气层二氧化碳浓度影响巨大, 从而以温室效应影响全球气候变化<sup>[3,4]</sup>. 青藏高原是地球陆地生态系统的重要组成部分, 是世界上低纬度冻土集中分布区, 作为欧亚大陆最高最大的地貌单元, 不仅对全球气候变化十分敏感, 而且在亚洲气候乃至全球气候变化中扮演重要角色<sup>[5]</sup>. 近年来, 青藏高原气温不断升高, 高寒草原退化, 由于冻土热力敏感性大, 因此高原冻土具有很大的碳、氮等温室效应气体的排放潜力<sup>[6,7]</sup>. 高寒草原退化区的生态环境的改变主要体现在土壤环境的恶化, 土壤水分和养分等方面条件的改变和功能的降低, 减少了能够适应生存的

物种, 降低了群落的结构的复杂性, 进而降低了生态环境的稳定性<sup>[7]</sup>. 正是由于青藏高原这种特殊的地理和生态单元及其对全球环境变化的重要作用, 研究青藏高原草地土壤碳、氮等元素空间特征对于评价青藏高原生物地球化学循环对全球环境变化的响应和反馈作用就具有重要的意义. 土壤是时空连续的变体, 具有高度的空间异质性<sup>[8-10]</sup>, 在一些草原的土壤有机碳氮的空间变异方面研究比较多<sup>[11-14]</sup>,

收稿日期: 2008-07-09; 修订日期: 2008-09-08

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973)项目(2007CB411504); 国家自然科学基金项目(40701022, 90511003); 国家社会科学基金项目(08CMZ010); 冰冻圈科学国家重点实验室开放基金项目(SKLC07-06); 水利部公益性行业科研专项(2007SHZ1-46)

作者简介: 李元寿(1972-), 男, 博士后, 主要研究方向为寒旱区生态环境. E-mail: yshli@lzb.ac.cn

但在多年冻土典型高寒草甸覆盖区的土壤碳氮变异特性方面缺乏研究. 本研究选择青藏高原的典型高寒草甸区, 利用地统计学的半变异函数定量分析土壤有机碳、氮的空间变异特性, 确定其空间变异的尺度, 分析引起土壤养分变异的生态过程, 以期找出人为活动对青藏高原典型高寒草甸生态环境的影响程度.

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

研究区位于青藏公路沿线北麓河附近 ( $34^{\circ}49.47'N$ ,  $92^{\circ}55.62'E$ , 海拔4 635 m), 青藏铁路沿线的冲洪积高平原上. 该地属于青藏高原高寒气候区, 寒冷干旱, 试验区年均气温为  $-5.2^{\circ}C$ , 年均降雨量 290.9 mm, 降水主要集中在 6~8 月, 年均蒸发量 1 316.9 mm, 相对湿度平均为 57%, 年均风速  $4.1 m \cdot s^{-1}$ . 由于所处的地理位置和特殊的气候条件, 受强烈冻融影响, 形成特殊的土壤水分和地下水运动状况. 成土母质多为第四纪沉积物及变质岩、中性侵入岩等岩石风化的坡、残积物, 砂砾石、碎石土基亚粘土夹碎石. 土壤发育很慢, 处于原始的粗骨土形态, 为典型的高山草甸土, 土层较薄, 厚约 60~70 cm<sup>[15, 16]</sup>. 冻土和地下冰比较发育, 河谷中存在着潜水, 常形成冰锥、冻胀丘; 斜坡地带常有冰锥、冰丘、冻融泥流及冻融滑塌发育; 连续多年冻土地区的地温为  $-3.0 \sim -1.0^{\circ}C$ , 多年冻土活动层厚度一般为 2~3 m, 天然冻土上限为 1.6~3.4 m, 年内冻结期长达 7~8 个月, 冻结期从 9 月~次年 4 月. 植被类型有高寒草甸、高寒沼泽草甸、高寒草原、高山寒漠等. 其中高寒草甸为研究区最为典型的植被类型, 局部地域有斑块状退化. 该样地区域在空间上的人为影响主要是新修铁路、铺设输电线路、埋设光缆线等工程活动和铁路边的疏水工程改变了水流的流向和通道, 直接或是间接的影响了地下水流路; 另外近几年工程施工以及试验人员观测践踏和藏民放牧牛羊的践踏等比较频繁.

### 1.2 土壤采样方法与分析

在 8 月下旬青藏高原北麓河一带植被生长已基本结束, 部分区域的草已经开始枯黄. 在相对平坦的典型高寒草甸区 ( $110 m \times 90 m$ ) 用邻接格子法 (contiguous grid quadrats) ( $10 m \times 10 m$ ) 取样, 共布设 88 个格点, 其横向与纵向间隔均为 10 m. 取样区域较为平坦, 样区南面比北面略低, 西面比东面略高, 平均坡度不超过  $5^{\circ}$ . 用土钻在每一取样格点的周围

随机取 3 个 0~10 cm 土层的混合样. 土壤有机碳和全氮含量分别采用重铬酸钾氧化-外加热法和开氏法测定<sup>[17]</sup>.

### 1.3 土壤有机碳和全氮含量空间变异分析

变异函数作为地统计学的基本工具, 用于估计变异函数的公式为<sup>[18, 19]</sup>:

$$\gamma(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [Z(xi) - Z(xi+h)]^2 \quad (1)$$

式中,  $N(h)$  是距离等于  $h$  时的点对数,  $Z(xi)$  是在位置  $xi$  处的数值,  $Z(xi+h)$  是在距离  $xi+h$  处的数值. 对计算出的各土壤性状的变异函数, 绘出曲线图, 并建立变异函数的理论模型. 通过模型中的块金值 (Nugget,  $C_0$ )、基台值 (Sill,  $C + C_0$ )、相关距离 (correlation length,  $a$ )、拱高 ( $C$ ) 与基台值之比 [ $C/C + C_0$ ] 等参数定量地分析各因子的空间变化规律<sup>[11~14, 18, 19]</sup>. 样本数据分析采用 SPSS 10.0 和地统计学软件 GS+ (Version 5, Gamma Design Software, Michigan, USA) 完成.

## 2 结果与分析

### 2.1 高寒草甸植被区土壤有机碳和全氮含量及 C/N 统计特征

研究区土壤有机碳和全氮的描述性统计结果如表 1 所示. 采样区土壤表层 (0~10 cm) 的有机碳平均含量为  $11.45 g \cdot kg^{-1}$ ; 全氮平均含量为  $1.02 g \cdot kg^{-1}$ , C/N 为 11.27; 有机碳和全氮含量及 C/N 的变化范围分别:  $6.28 \sim 16.83 g \cdot kg^{-1}$ 、 $0.57 \sim 1.70 g \cdot kg^{-1}$  和  $6.65 \sim 15.15$ , 变异系数 ( $C_v$ ) 分别为 0.23、0.21、0.12. 该区域的有机碳和全氮的平均值与变化和内蒙古高原针茅草原的相近<sup>[12]</sup>. 表明研究区土壤有机碳和全氮含量总体水平较低, 且变化较大. 这主要是因为高寒草甸下发育着高山草甸土, 土层薄, 一般为 30~50 cm, 高山草甸土常以细沙粒和粗粉粒为主, 黏粒较少, 质地为轻壤、沙壤, 淋溶作用强, 除草皮层外, 全剖面含砾石 5%~30%, 自上而下逐层增多<sup>[6, 20, 21]</sup>. 这样的土质和当地的气候条件都不利于土壤有机碳和氮的累积, 致使该区土壤有机碳含量总体水平较低. 进一步对样本数采用 SPSS 11.0 中的单样本柯尔莫哥洛夫斯米诺夫 [One-sample Kolmogorov-Smirnov (KS)] 检验, 检验结果表明, 高寒草甸植被区土壤有机碳和全氮含量以及 C/N 均符合正态分布. 因此, 不需对原始数据进行转换就可进行地统计学分析.

表1 土壤有机碳和全氮的描述性统计参数特征

Table 1 Statistics characteristic of soil organic carbon, total nitrogen content and C/N

土壤性状	最小值	最大值	平均值	标准偏差 Std.	变异系数 $C_v$	偏度系数	峰度系数	分布型
有机碳 $g \cdot kg^{-1}$	6.28	16.83	11.45	2.61	0.23	0.31	-0.49	正态
全氮 $g \cdot kg^{-1}$	0.57	1.70	1.02	0.21	0.21	0.42	0.76	正态
C/N	6.65	15.15	11.27	1.38	0.12	-0.44	1.20	正态

高寒草甸区土壤有机碳和全氮的回归分析(如图1)表明,二者存在着显著的正相关关系( $p < 0.05$ ),相关系数  $r$  达 0.81,其回归方程为  $y = 0.2715x + 0.0653x$ . 这表明高寒草甸覆盖下的土壤有机碳和全氮具有明显的空间相关性,该结果与王根绪等<sup>[20]</sup>在青藏铁(公)路沿线大范围的考察研究结果是一致的。

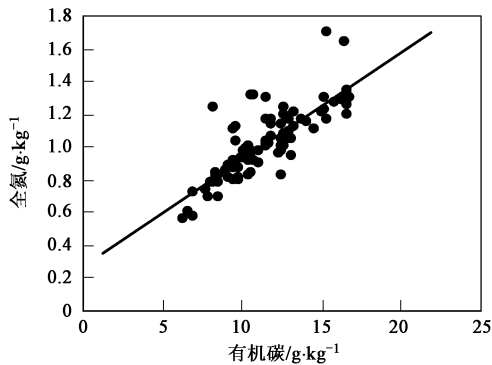


图1 土壤有机碳和全氮的相关关系

Fig. 1 Relationship of soil organic carbon and total nitrogen

## 2.2 高寒草甸植被区土壤有机碳和全氮含量及C/N空间异质性分析

用经典的统计分析方法统计的平均数、变异系数反映的是相对变异.因此,表1所给出的土壤变异仅是从统计的角度描述这些因子的变化,并没有反映出土壤有机碳和全氮在空间上的变化规律.变异函数  $\gamma(h)$  是区域化变量在分隔距离上各样本变异

的量度<sup>[11,18]</sup>,可有效地分析出高寒草甸覆盖下土壤有机碳和氮的变异规律.从表2中可以看出,高寒草甸植被覆盖下0~10 cm的土壤有机碳含量的  $C_0/(C_0+C)$  值为44.7%,表明表层土壤的有机碳主要是受高寒草甸植被、土壤本身的性质及强烈的近地表气候等空间自相关导致的变异与随机因素如人类活动、根系分布及生长状况、微生物数量和生物活性等引起的异质性相近(44.7%).而全氮含量的  $C_0/(C_0+C)$  值为49.9%,表明空间自相关部分和随机部分引起的空间异致性均等,C/N的  $C_0/(C_0+C)$  为1,表明C/N在整个尺度上具有恒定的变异.从结构性因子角度来看, $C_0/(C_0+C)$  的比例可表示系统变量的空间相关性程度,比值 $< 25\%$ 、 $25\% \sim 75\%$ 、 $> 75\%$  分别表示变量的空间相关性较强、中等、较弱<sup>[11,18,19]</sup>.与白云飞等<sup>[12]</sup>在内蒙古高原针茅草原群落表层土壤碳的结构性方差比例52.17%~98.73%和土壤氮的结构性方差比例76.67%~99.74%相比,结合上述结果可以判断出青藏高原典型高寒草甸区表层0~10 cm土壤的有机碳和全氮的空间相关性中等,表明结构性因子如土壤形成过程中的成土母质(第四纪沉积物及岩石风化的坡、残积物)、土壤类型(高山草甸土)等空间自相关部分比例降低,随机因子如改变水流的方向、人践踏、放牧、根系分布和地下生物量等随机因子的影响升高,且二者的影响程度达到了相当的水平,有机碳和全氮在空间结构都没有表现出显著的差异来。

表2 土壤有机碳和全氮的变异函数模型及相关参数

Table 2 Semi-variogram model and parameters for soil organic carbon, total nitrogen content and C/N

土壤性状	模型	块金值( $C_0$ )	基台值( $C_0+C$ )	变程/m	$C_0/(C_0+C)$	$R^2$	RSS	分维数 $D$
有机碳 $g \cdot kg^{-1}$	Exponential	5.480	12.255	210.9	0.447	0.744	1.010	1.933
全氮 $g \cdot kg^{-1}$	spherical	0.032	0.065	200.1	0.499	0.923	0.000	1.907
C/N	Linear	1.909	1.909	83.3	1	0.001	0.185	1.995

尽管从结构性因子角度来讲,高寒草甸植被区的地表土壤有机碳和全氮含量空间变异呈中等水平,但从分形维数  $D$  这个无量纲数的角度进一步验证了引起高寒草甸植被区的地表土壤有机碳和全氮含量空间变异的细微差别.其中高寒草甸土壤表层

全氮对空间的相关性强于有机碳的相关性,变程  $m$  越大  $D$  越小,土壤表层全氮格局变异的空間相关性越强,反之,由随机因素引起的异质性占有较大的比重.由于多年冻土区高寒草甸等生态环境的脆弱性,人为工程影响以及和牛羊的践踏等影响直接改变了

表层和地下水流方向、植被的生长等改变了土壤养分构成, 加剧了表层土壤中有有机碳、氮的流失, 影响了表层土壤中的有机碳、氮的分布及碳、氮循环过程, 人类活动对脆弱高寒草甸生态系统的影响应引起重视。

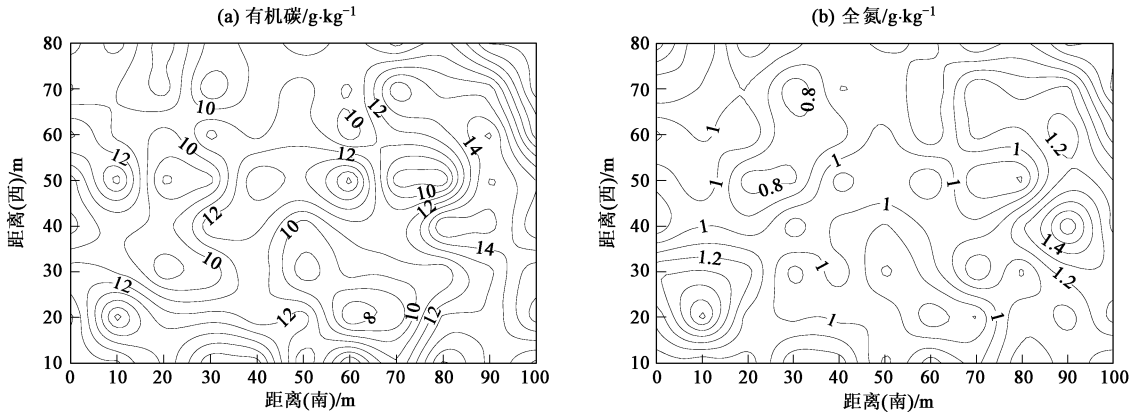


图2 土壤有机碳和全氮空间分布

Fig.2 Spatial distribution map of soil organic carbon and total nitrogen

在高寒草甸植被覆盖下的土壤有机碳和全氮的 Kriging 等值线图中, 0~10 cm 的土壤有机碳和全氮的空间连续性较差, 具体都呈斑块状不均匀分布。由于高寒草甸下发育高山草甸土土层薄, 常以细沙粒和粗粉粒为主, 粘粒较少, 淋溶作用强<sup>[21, 22]</sup>。王文颖等<sup>[21]</sup>研究表明高寒草甸退化导致 0~20 cm 土层中的 50.87% 的有机碳和 30.75% 的氮流失, 高寒草甸退化后流失的有机碳比氮多。Grieve<sup>[22]</sup>研究了苏格兰高海拔山地(旅游地), 由于人为干扰和冻融扰动作用使草甸植被斑块状退化, 退化后的迹地的土壤有机碳丢失 54% 之多。草原土壤的有机碳和全氮含量随深度增加递减, 其中 70% 以上集中在 0~30 cm 土层中, 它们主要是来自地表有机质的分解<sup>[22]</sup>, 表层扰动后最容易引起流失。在青藏高原上, 随着气温的升高, 冻土环境也在发生着变化, 冻土环境的变化改变了各类生物资源的组成、分布及演化交替规律, 高寒草甸植被有利于多年冻土的保存和发育, 而冻土环境又能为植物生长提供充足的水分及独特的生态环境, 植被与多年冻土二者的关系是相辅相成、相互制约、相互作用、协同演化。地表条件的改变, 改变了水流方向, 水分的改变很容易改变植被的生长状况, 也很容易引起冻土层的变化, 因此对环境的变化敏感性大, 生态环境必将对多年冻土的变化积极响应以适应这种生存环境的变化, 一旦破坏短时间内难以恢复<sup>[4, 15, 20~24]</sup>。该区域年均降雨量 290.9 mm, 又

2.3 高寒草甸区土壤有机碳和全氮空间分布特性  
利用 Kriging 方法绘制了土壤有机碳和全氮含量空间分布的等值线图。等值线图的绘制在 Surfer 软件中完成, Kriging 各参数的设置参照表 2 的半变异函数模型参数, 插值结果如图 2 所示。

集中分布在植被生长季的 6~9 月<sup>[15, 16]</sup>, 这一段时期正好也是高原多年冻土活动层的融化期<sup>[23]</sup>, 没有植被覆盖的斑块内土壤有机碳和全氮很容易被淋溶流失<sup>[20, 21]</sup>。因此, 高寒草甸植被一旦遭到破坏, 致使局部退化, 改变土壤水分和养分的空间格局变化, 加剧土壤有机碳和全氮的流失而造成空间的不连续性。

2.4 高寒草甸区土壤有机碳和全氮空间异质性尺度效应

为了进一步研究典型高寒草甸覆盖区土壤有机碳和全氮的变异特征和空间分布, 探讨和分析了空间异质性的尺度。土壤有机碳和全氮的空间格局由不同尺度的自然作用和过程控制, 同时土壤有机碳和全氮空间变异的尺度和特征也反映了这些自然过程变异的尺度和特征。但是土壤有机碳和全氮真实变异特征与样本数据所呈现出的变异特征是有区别的。表 2 结果看出: 在 0~10 cm 土层内土壤有机碳的空间异质性的自相关尺度达 210.7 m, 土壤全氮的达 209.1 m, C/N 为 83.3 m, 表明表层土壤有机碳和全氮空间变异尺度接近, 另外自相关尺度均大于采样尺度 10 m, 表明该样地的采样尺度是有效的。结合采样尺度(10 m)和有机碳和全氮的变异尺度的结果可知, 有机碳在 0~10 cm 土壤随机因素引起的空间异质性占总空间异质性的 44.7%, 且主要体现在采样距离 10 m 以下的小尺度上, 而空间自相关部分引起的空间异质性占 55.3%, 体现在 10~210.9 m

的尺度范围内,全氮的空间异质性约有 49.9% 由 10 m 以下尺度的随机因素引起,而 10~ 200.1 m 的尺度范围内自相关因素引起的空间异质性占 50.1%。这从土壤有机碳和全氮空间异质性尺度的角度印证了表层土壤有机碳和全氮有较高的空间自相关性,且分布尺度较大。随机因素的影响主要发生在采样尺度 10 m 的范围之内,相比自相关性随机的影响主要发生在小尺度范围内。0~ 10 cm 正好是高寒草甸根系密集分布区,可以初步推断出在青藏高原高寒草甸覆盖的多年冻土活动层内,土壤有机碳和全氮的空间异质性主要与高寒草甸的根系分布有关,且相互依存。

大量研究表明,由于高寒植被覆盖和冻土特征的复杂性而导致了土壤养分和土壤水分条件在小范围内显著变异<sup>[21]</sup>。多年冻土对于气温变化十分敏感,且覆盖在地表的高寒草甸分布与发育状况与冻土环境具有密切关系,随着全球气温升高及其耦合的冻土变化对该区域高寒系统形成协同作用<sup>[25,26]</sup>,叠加气候因素和人为活动的影响加剧了多年冻土的变化。但是在试验区内降水量、蒸发量等自然的影响都不会有大的差异,人为工程等活动改变了水流方向,直接影响冻土活动层的水分状况,在多年冻土地带容易形成积水区和疏干区,而影响到植被的生长状况和养分分布,研究区正好是水分流路阻断和改变后的疏干区。研究结果显示出土壤有机碳和全氮浓度和贮量也强烈地受土壤自相关因素的影响并在小范围内存在显著变异,青藏高原典型高寒草甸覆盖区的有机碳和氮分布空间异质性较大,有机碳和氮自相关因素的影响降低而随机因素的增加直接反映出人为对环境的影响,尤其人为工程施工等活动对局部高寒草甸层土壤养分的影响不容忽视。

### 3 结论

(1) 青藏高原典型高寒草甸区 0~ 10 cm 的土壤有机碳和全氮的平均含量分别为  $11.45 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$  和  $1.02 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 平均变异系数分别为 0.23 和 0.21; 土壤有机碳和全氮块金方差与基台值之比  $C_0/(C_0 + C)$  分别为 44.7%、49.9%, 二者均表现出空间自相关因素大于随机因素的变异格局; 有机碳和全氮两者在结构性因子上没有表现出显著的差异来,表明随机因素和空间自相关因素共同起作用,影响程度呈中等水平。在空间结构的变异上土壤有机碳和全氮随机因素已经增加并接近自相关因素的影响。表明人为因素如工程施工及放牧等践踏等引起的随机

因素的影响也占较大比重。

(2) 0~ 10 cm 土壤中的有机碳和全氮有较高的空间自相关性,分别占 55.3% 和 50.1%; 且分布尺度较大,分别在 10~ 210.90 m 和 10~ 200.10 m 的范围, C/N 的变程最小为 83.3 m, 最大达 210.9 m。土壤有机碳和全氮随机因素的影响分别为 44.7% 和 49.9%, 主要发生在采样尺度 < 10 m 的范围之内,可以认为是草甸斑块状退化的主要尺度影响因素。高寒草甸覆盖的土壤有机碳和全氮之间有高度的相依性,且在空间的自相关因素还是占主要地位。由于局部退化,呈斑块状高寒草甸植被分布格局改变了土壤养分的空间格局,表现的空间连续性较差,进一步证实了青藏高原高寒草甸覆盖的多年冻土区生态环境的脆弱性。

### 参考文献:

- [1] Batjes N H, Sombrink W G. Possibilities for carbon sequestration in tropical and sub-tropical soils[J]. *Global Change Biology*, 1997, **3**: 161-173.
- [2] Domaar J F, Sylvester S, Walter D W. Distribution of nitrogen fractions in grazed and ungrazed fescue grass land Ah horizons[J]. *Journal of Range Management*, 1990, **43**(1): 6-9.
- [3] Martin H. Modern global carbon cycle and the review of Arrhenius and Høghem's prediction one hundred years ago[J]. *AMBIO*, 1997, **26**(1): 17-24.
- [4] 王根绪,程国栋,沈永平. 青藏高原草地土壤有机碳库及其全球意义[J]. *冰川冻土*, 2002, **24**(6): 693-700.
- [5] 程国栋,李培基,张祥松,等. 气候变化对中国积雪、冰川和冻土的影响评价[M]. 兰州:甘肃文化出版社, 1997. 22-56.
- [6] Wang G X, Qian J, Cheng G D, *et al.* Soil organic carbon pool of grassland soils on the Qinghai-Tibetan plateau and its global implication[J]. *Science of the Total Environment*, 2002, **291**: 207-217.
- [7] Wang G X, Li Y S, Wang Y B, *et al.* Effects of permafrost thawing on vegetation and soil carbon pool losses on the Qinghai-Tibet Plateau, China[J]. *Geoderma*, 2008, **143**: 143-152.
- [8] Huggert R J. Soil chronosequences, soil development, and soil evolution: a critical review[J]. *Catena*, 1998, **32**: 155-172.
- [9] Trangmar B B, Yost R S, Uehara G. Application of geostatistics to spatial studies of soil properties[J]. *Advances in Agronomy*, 1985, **38**: 45-94.
- [10] 王军,傅伯杰,邱扬,等. 黄土高原小流域土壤养分的空间异质性[J]. *生态学报*, 2002, **22**(8): 1173-1178.
- [11] Li H B, Reynolds J F. On definition and quantification of heterogeneity[J]. *Oikos*, 1995, **73**: 280-284.
- [12] 白云飞,许志信,李德新. 内蒙古高原针茅草原群落土壤水分和碳、氮分布的小尺度空间异质性[J]. *生态学报*, 2002, **22**(8): 1215-1223.
- [13] 李明峰,董云社,耿元波,等. 草原土壤的碳氮分布与 CO<sub>2</sub> 排放通量的相关性分析[J]. *环境科学*, 2004, **25**(2): 7-11.
- [14] 白军红,邓伟,张玉霞,等. 洪泛区天然湿地土壤有机质及氮素

- 空间分布特征[J]. 环境科学, 2002, 23(2): 77-81.
- [15] 王根绪, 沈永平, 钱鞠, 等. 高寒草地植被覆盖变化对土壤水分循环影响研究[J]. 冰川冻土, 2003, 25(6): 653-659.
- [16] 李元寿, 王根绪, 沈永平, 等. 长江源区不同植被覆盖下产流产沙效应初步研究[J]. 冰川冻土, 2005, 27(6): 896-875.
- [17] 刘光崧. 土壤理化分析与剖面描述[M]. 北京: 中国标准出版社出版, 1996.
- [18] 王政权. 地统计学及在生态学中的应用[M]. 北京: 科学出版社, 1999.
- [19] Goovaerts P. Geostatistical tools for characterizing the spatial variability of microbiological and physico-chemical soil properties[J]. Biol Fertil Soils, 1998, 27: 315-334.
- [20] 王根绪, 吴青柏, 王一博, 等. 青藏铁路工程对高寒草地生态系统的影响. 青藏铁路建设和生态环境保护专题[J]. 科技导报, 2005, (1): 8-13.
- [21] 王文颖, 王启基, 王刚. 高寒草甸土地退化及其恢复重建对土壤碳氮含量的影响[J]. 生态环境, 2006, 15(2): 362-366.
- [22] Grieve I C. Effects of human disturbance and cryoturbation on soil iron and organic matter distributions and on carbon storage at high elevations in the Cairngorm mountains, Scotland[J]. Geoderma, 2000, 95(1-2): 1-14.
- [23] 周幼吾, 郭东信, 邱国庆, 等. 中国冻土[M]. 北京: 科学出版社, 2000. 299-360.
- [24] 赵林, 程国栋, 李述训. 高原冻土变化及环境工程效应[A]. 见: 郑度. 青藏高原形成环境与发展[M]. 石家庄: 河北科学技术出版社, 2003. 143-150.
- [25] 金会军, 李述训, 王绍令, 等. 气候变化对中国多年冻土和寒区环境的影响[J]. 地理学报, 2000, 55(2): 161-173.
- [26] 王根绪, 李元寿, 王一博, 等. 近 40 年来青藏高原典型高寒湿地系统的动态变化[J]. 地理学报, 2007, 62(5): 481-491.