#### DOI: 10.5846/stxb201901090083

李龙,秦富仓,姜丽娜,姚雪玲.区县域尺度土壤全氮的空间分布格局分析.生态学报,2020,40(5):1572-1579. Li L, Qin F C, Jiang L N, Yao X L.Spatial distribution patterns of soil total nitrogen at a county scale. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(5):1572-1579.

# 区县域尺度土壤全氮的空间分布格局分析

李 龙<sup>1,\*</sup>,秦富仓<sup>1</sup>,姜丽娜<sup>2</sup>,姚雪玲<sup>3</sup>

1 内蒙古农业大学,沙漠治理学院,呼和浩特 010011
 2 中国林业科学研究院林业新技术研究所,北京 100091
 3 中国林业科学研究院林业荒漠化研究所,北京 100091

摘要:以赤峰市敖汉旗为研究对象,以实测数据为基础,采用地统计学与典范对应分析相结合的方法研究县域尺度土壤全氮的 空间分布格局及其影响因素。结果表明:0—100 cm 深度土壤全氮含量在 0.43—0.68 g/kg 范围变化,土壤全氮平均含量随着土 壤深度的增加而降低,其水平分布均呈现为南高北低的分布特征,低值区集中呈片状分布在研究区的东北部,高值区呈岛状分 散于研究区的南部区域。各层土壤全氮均属于中等强度的空间相关性,随着土壤深度的增加,随机因素对全氮空间变异的影响 作用逐渐减弱,其空间最大自相关距离也随着土壤深度的增加而逐渐减小。各环境因素对土壤全氮含量的影响程度由高到低 表现为海拔>NDVI>粘粒含量>土壤容重>坡度,土壤粘粒和 NDVI 与表层土壤的相关性更高,海拔对 60 cm 以下土壤全氮的影 响更加显著。

关键词:土壤全氮;空间变异;地统计;土壤深度

# Spatial distribution patterns of soil total nitrogen at a county scale

LI Long<sup>1,\*</sup>, QIN Fucang<sup>1</sup>, JIANG Lina<sup>2</sup>, YAO Xueling<sup>3</sup>

1 College of Desert Control Science and Engineering, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010011, China

2 Research Institute of Forestry New Technology, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China

3 Institute of Desertification Studies, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China

**Abstract**: The spatial variability and distribution patterns of total nitrogen content in 0-100 cm deep soil were analyzed to determine the dominant factors affecting the spatial variability of total nitrogen content in different soil depths in Aohan County. The analyses were based on soil survey data, geostatistics, and canonical correspondence analysis. The results showed that the variation range of total nitrogen content was 0.43--0.68 g/kg in 0-100 cm soil depths, and the total nitrogen content decreased gradually with increasing soil depth. Obvious differences between North and South were found. A moderate spatial correlation of total nitrogen was found in 0-100 cm soil depths. With increasing soil depth, the spatial variability caused by random factors gradually decreased, and the spatial autocorrelation distance of total nitrogen decreased gradually. The effects of environmental factors on soil total nitrogen content from high to low were as follows: elevation > normalized difference vegetation index(NDVI) > clay content > soil bulk density > slope, in which soil clay and NDVI had higher correlations with surface soil, and elevation had a more significant effect on soil total nitrogen below 60 cm soil depths.

Key Words: soil total nitrogen; spatial variability; geostatistics; soil depth

收稿日期:2019-01-09; 网络出版日期:2019-12-17

基金项目:国家自然科学基金青年基金项目(41807079)

<sup>\*</sup> 通讯作者 Corresponding author.E-mail: lilongdhr@126.com

土壤中的氮元素不仅是保障植物正常生长的必需元素,也是衡量土壤肥力的重要指标之一。土壤全氮是 指土壤中各种形态氮素含量的总和,准确掌握土壤全氮含量的空间分布格局及其变异特征是区域合理利用土 地资源、进行精准施肥的重要前提<sup>[1-2]</sup>。与此同时,土壤全氮的空间变异受到自然和人为等多种因素的共同 影响<sup>[3]</sup>,众多学者也纷纷研究指出,地形<sup>[4]</sup>、植被<sup>[5-6]</sup>、土地利用方式<sup>[7]</sup>以及土壤侵蚀<sup>[8]</sup>等诸多因素均显著地 影响着土壤全氮的空间分布格局。

随着精准农业的发展和科学利用土地的要求日益提升,找到控制土壤全氮空间分布的主导因素对揭示土 壤全氮分布规律起着极其重要的作用,在全球气候变化的大背景下,深层土壤氮库的氮储量十分巨大<sup>[9]</sup>,并 占据着极为重要的地位,然而类似的研究多集中于对表层土壤全氮的研究中<sup>[10-12]</sup>,土壤全氮的垂直分布特征 同样需要更多的关注。Dwivedi 等<sup>[13]</sup>研究表明受到土壤深度变化的影响,不同土层感知外界环境变化的敏感 程度也存在显著地差异。Fierer 等<sup>[14]</sup>也指出深层土壤对温度和养分的变化相比表层土壤更加敏感。由此可 见,各环境因素在不同土层上对土壤全氮含量的作用程度也必然呈现加大差异,土壤全氮的垂直分布及其影 响因素仍然是当前土壤氮库的研究的焦点问题。

因此,本研究以赤峰市敖汉旗为研究对象,以实测数据为基础,分析 0—100 cm 深度范围内 5 层土壤全氮 含量的分布特征,结合地理信息系统与地统计学,对敖汉旗土壤全氮含量的空间分布进行预测,揭示影响各层 土壤全氮空间变异的主导因子。旨在为县域尺度的土壤氮库研究提供科学参考和基础数据。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

研究区位于内蒙古自治区赤峰市东南部的敖汉旗(119°30′—120°54′E、41°42′—42°02′N),全旗总面积约 为8300 km²,地势起伏多变、总体呈南高北低特征,海拔为300—1250 m;多年平均降水量在310—460 mm之 间,且由南向北递减;年均蒸发量为2000—2600 mm,年平均气温为6℃,冬季寒冷干燥,夏季温热、降雨集中, 属于温带半干旱大陆性气候。敖汉旗处于欧亚干草原区,地带性植被以疏林草原为主,从南到北呈现出由森 林和森林草原逐渐向干草原过渡的规律,全旗主要分布有4个土类,南部山地主要为棕壤和褐土,中部黄土丘 陵及黄土漫岗主要为栗钙土,北部沙地主要以风沙土为主。敖汉旗土地利用类型多样属于农牧交错地带,以 农为主,农牧林结合的经济类型区,其中,林地面积为3945 km²,全旗形成带网片、乔灌草相结合的防护林体 系;耕地面积为1776 km²,约占全旗面积的21.39%;草地面积为1695 km²,占全旗面积的20.41%。

### 1.2 样地选择与样品采集

在野外实地调查的基础上,综合考虑土壤、植被、地形地貌以及土地利用方式等因素,于2014年8月在敖 汉旗选取典型样点,确保所选样地能够充分反映研究区的基本特征,共确定182个典型样点(表1,图1)。

	Tabl	le 1 The distribution of	sample properties in st	uuy area			
坡度	海拔 Altitude/m						
Slope/(°)	<500	500—700	700—900	900—1100	>1100		
<5	14	20	25	16	6		
5—10	6	8	11	8	4		
10—15	6	4	5	4	3		
15—20	3	6	8	3	1		
20—25	2	2	3	4	1		
>25	1	3	2	3	0		

表1 研究区采样点属性分布表

确定样点后,记录样地的坐标及地形地貌、土壤类型、土地利用方式等基本信息。去除样地内土壤表层的 植被、枯落物等杂质,挖掘标准土壤剖面,按照 0—20 cm,20—40 cm,40—60 cm,60—80 cm,80—100 cm 划分 5 层,由下至上分层取样,每层取 3 个重复,装入无菌袋带回实验室待测。土壤全氮含量采用半微量开氏蒸馏 法测定;土壤机械组成采用 Mastersizer3000 激光粒度分 析仪测定,参照美国农业部土壤粒径分级标准,按土壤 颗粒大小确定样品粘粒(<0.002 mm)、粉粒(0.05— 0.002 mm)和砂粒(2—0.05 mm)的百分含量<sup>[15]</sup>;土壤 容重采用环刀法测定。

将敖汉旗 2014 年的(Landsat 8) 遥感影像重新配准 校正后,在 ENVI 5.1 软件和 ArcGIS 下完成归一化植被 指数(NDVI)的计算。

采用的计算公式为:

NDVI=(LNIR-LR)/(LNIR+LR) (1) 式中,LR 表示红光波段的行星反射值;LNIR 表示近红 外波段的行星反射值。

1.3 数据分析

1.3.1 地统计学

地统计学(Geostatistics)也称为地质统计学,于 50 年代初开始形成,在法国著名统计学家 G.Matheron 的 大量理论研究工作基础上形成一门新的统计学分支。 地统计学是以变异函数理论和结构分析为基础,在有限 区域内对区域化变量进行无偏最优估计的一种方 法<sup>[16]</sup>。半变异函数又称半方差函数,是地统计分析的 特有函数。区域化变量 Z(x)在点 x和 x+h处的值 Z(x)与Z(x+h)差的方差的一半称为区域化变量 Z(x)的半变异函数,记为  $\gamma(h)$ ,  $2\gamma(h)$ 称为变异函数。其 数学表达式为:







式中, h 为两样本点空间距离;  $\gamma(h)$  是 h 的半方差函数值; N(h) 是间隔距离等于 h 的样本点的对数;  $Z(x_i)$  为 空间位置点  $x_i$  处指标的实测值;  $Z(x_i+h)$  为空间位置点  $x_i + h$  处指标的实测值。

基于地统计学原理,采用 GS+7.0 软件完成半方差函数的计算和理论模型的拟合,并结合 ArcGIS10.0 软件中 Geostatistical Analyst 模块,对采样点进行克里格插值,生成土壤全氮含量的空间分布图。

**1.3.2** 典范对应分析(Canonical correspondence analysis, CAA)

典范对应分析(CCA)是由对应分析发展而来的一种多元数据测序方法,其通过检验两个变量的线性组 合之间的相关性,将因变量矩阵映射到描述变量矩阵中,并在排序模型中插入回归模型,使观测因子和环境因 子的关系在排序图中直观表达,同时可用 CCA 分析结果进行变量影响的贡献分离,并准确估计自变量的贡 献。其数学表达式为:

$$x_{i} = b_{0} + \sum_{j=1}^{q} b_{j} z_{ij}$$
(3)

式中, $x_i$ 代表站点 i 的排序得分, $b_0$ 代表截距, $b_j$ 是环境变量j 的回归系数,q 代表环境变量的数量, 而  $Z_{ij}$ 是站点 i 的环境变量j 的值。

CCA 排序图中箭头连线的长度表示土壤有机碳变异与环境因子的相关性,连线越长,相关性越大;箭头连线与排序轴的夹角表示该环境因子与排序轴相关性的大小,夹角越小,相关性越高;各箭头连线之间的夹角表示各环境因子间的相关性,夹角越小,相关性越高。研究采用 CCA 法分析土壤全氮含量对环境变量的响应

关系,并通过蒙特卡罗交互验证发法判断环境因素对土壤全氮影响到显著水平,CCA 是使用 R 3.0.1 软件中的 Vegan 包执行<sup>[17]</sup>。

本研究中的全部基础统计分析均在 R3.0.1 软件下完成。

# 2 结果与分析

2.1 土壤全氮含量的垂直分布特征

对研究区内 182 个样地数据进行统计分析,结果如表 2 所示,研究区 0—100 cm 深度土壤全氮的分布范 围在 0.43—0.68 g/kg 之间,其平均含量随着土壤深度的增加呈现逐级递减的垂直分布规律;方差分析表明, 0—40 cm 深度的土壤全氮含量显著高于 40 cm 深度以下的土壤全氮含量(P<0.05)。这主要是由于表层土壤 能够最直接地获取地表枯落物以及动物残体分解后的养分补给,因此,土壤表层全氮含量显著高于其他土层。 参照我国土壤养分分级标准,敖汉旗土壤全氮含量整体处于相对亏缺的水平(V:0.5—0.75 g/kg),其中 60 cm 深度以下的土壤全氮含量处于严重亏缺的水平(V:0.5 g/kg)<sup>[18]</sup>。就数据分布特征而言,各层土壤全氮 含量均呈现为轻度的正向右偏态分布特征,峰度值略低。变异系数(CV)分析得知,各层土壤全氮含量均处在 0.45—0.50 之间,并为表现出明显的分布差异,均属于中等程度的变异<sup>[19]</sup>。

		Table 2	Basic statistics of soil	total nitrogen at	t different depths		
土壤深度 Soil depth/cm	最小值 Minimum⁄ (g/kg)	平均值 Mean⁄ (g/kg)	最大值 Maximum/ (g/kg)	标准差 Stand. Dev.	变异系数 Coefficient of variation/%	偏度 Skewness(-)	峰度 Kurtosis(-)
0—20	0.20	0.68a	1.79	0.30	44.64	1.16	1.70
20—40	0.15	0.61a	1.64	0.28	45.64	1.15	1.74
40—60	0.09	$0.54\mathrm{b}$	1.68	0.25	46.95	1.48	2.33
60—80	0.01	0.47c	1.37	0.22	46.45	1.11	2.10
80—100	0.01	0.43c	1.21	0.21	49.75	1.02	1.56

表 2 不同土壤深度上全氮含量的分布特征

由方差分析得出,表中标有不同字母的数据表示在 P<0.05 水平下具有显著差异

# 2.2 土壤全氮含量的空间变异特征

地统计学通过半方差函数模型能够定量地描述土壤全氮空间变异的结构性因素与随机性因素,准确地分析土壤全氮的空间变异结构。模型拟合结果显示,不同土壤深度内土壤全氮含量在各个方向上均无显著差异,无需考虑数据的各向异特征,对比不同模型的拟合精度,最终得出 0—100 cm 深度土壤全氮的半方差函数 理论模型及相关参数(表 3)。

	Table 3	Theory model and parameters of semivariogram for total nitrogen content					
土壤深度 Soil depth/cm	模型 Model	块金值 Nugget/ C <sub>0</sub>	基台值 Sill/ C <sub>0</sub> + C	变程 Range/m	块金值/ 基台值 Nugget/Sill C <sub>0</sub> /(C <sub>0</sub> +C)/%	残差 Residual sum of squares	决定系数 Coefficient of determination (R <sup>2</sup> )
0—20	Spherical	0.047	0.064	2450	73.4	0.105	0.71
20—40	Spherical	0.039	0.059	2700	66.1	0.421	0.74
40—60	Spherical	0.132	0.188	2700	70.4	0.217	0.79
60—80	Spherical	0.097	0.141	3000	68.8	0.186	0.82
80—100	Spherical	0.258	0.511	3300	50.5	0.209	0.80

表 3 土壤全氮含量的半方差函数理论模型及相关参数

半变异函数的拟合结果显示,0—100 cm 各层土壤全氮均适用于 Spherical 模型,其拟合决定系数 R<sup>2</sup>在 0.71—0.82 之间,拟合残差处于较低水平,在 0.105—0.421 之间,表明拟合具有较好的拟合效果,能够反映土

壤全氮的空间变异特征。块金基台比(C<sub>0</sub>/(C<sub>0</sub>+C))是反映土壤有机碳数据间空间自相关性的重要指标。研 究区各层土壤全氮的C<sub>0</sub>/(C<sub>0</sub>+C)处于50.5%—73.4%之间,均属于中等强度的空间相关性,结构性因素与随 机性因素共同作用影响着土壤全氮的空间变异结构,而随机性因素主要表现为人为活动、土地利用方式转变 等,并在研究区全氮的空间变异中占据了主要地位;结构性因素主要表现为地形、土壤母质、降雨分布格局等。 随着土壤深度的增加,随机因素对全氮空间变异的影响作用逐渐减弱,其空间最大自相关距离(变程)也随着 土壤深度的增加而逐渐减小,这说明在深层土壤中土壤全氮受到外界干扰较弱,相对表层土壤仍保持着较高 的内在自相关关系。

就土壤全氮的空间分布格局而言(图2),研究区 0—100 cm 深度土壤全氮含量的分布趋势基本一致,均 呈现出南高北低的分布特征,在各层土壤中全氮的低值区均集中呈片状分布在研究区的东北部,高值区呈岛 状分散于研究区的南部区域,且 40 cm 以上的土壤全氮南北分布差异相对于深层土壤更加明显。



图 2 不同土壤深度土壤全氮含量空间分布图



2.3 环境因素对土壤全氮含量的影响

典范对应分析(CCA)可以有效地分析影响因子对不同深度土壤全氮的影响(表 4, 图 3), CCA 分析表明,

第一排序轴主要为 NDVI,海拔,坡度对土壤全氮含量的综合反映,对土壤全氮含量的综合解释达到 91.24%, 其中,海拔和 NDVI 与第一排序轴具有显著相关性(P<0.05)。第二排序轴主要是土壤容重和土壤粘粒含量的 综合反映,土壤粘粒含量与第二排序轴均有显著的相关性(P<0.05),二者对土壤全氮含量的解释达到3.63%。 第一排序轴和第二排序轴对土壤全氮的累积解释达到 95.17%,说明第一排序轴和第二排序轴反映了环境因 子与土壤全氮的大部分信息,两排序轴均与土壤全氮含量显著相关(P<0.01),可以较好地解释环境因素对土 壤全氮的影响。

Table 4	Summary statistics of canonical correspondence analysis	
环境因素 Environmental factors	第一排序轴 Axis 1	第二排序轴 Axis 2
海拔 Altitude	0.698 *	-0.234
坡度 Slope	-0.306	-0.141
土壤容重 Soil bulk density	-0.213	-0.409
土壤粘粒含量 Clay	0.389	0.564 *
归一化植被指数 NDVI	0.677 *	0.292
典范对应分析排序轴 CCA ordination		
特征值 Characteristic value	24.09	1.23
环境因子的累积解释率 Cumulative interpretation rate of environmental factor	ors/% 91.24	3.93
排序轴显著水平 Significant level of sorting axis	0.01	0.01

表 4 典范对应分析参数统计表

\*表明环境因素在 P=0.05 水平下与排序轴具有显著相关性

坡度和土壤容重与土壤全氮含量成负相关关系,NDVI,土壤粘粒含量,海拔与土壤全氮成正相关关系。 各环境因素对土壤全氮含量的影响程度由高到低表现为海拔 NDVI>粘粒含量>土壤容重>坡度。其中土壤粘 粒和 NDVI 与表层土壤的相关性更高,海拔对 60 cm 以下土壤全氮的影响更高。

## 3 讨论

## 3.1 土壤全氮的空间分布格局

土壤全氮的空间分布格局是在多种因素共同作用 下而形成,在本研究区内土壤全氮的水平分布呈现出较 为明显的异质性,各土壤深度上全氮的低值区域均位于 研究区东北部,高值区域主要位于中南部,并呈现为由 北向南逐步增加的分布趋势。这与研究区植被、土壤分 布格局密切相关,敖汉旗地处科尔沁沙地南缘,其南北 部土壤、植被分布差异较为明显,而敖汉旗土壤由北到 南为风沙土、栗钙土、褐土、棕壤,受风沙活动的影响,研 究区北部的土壤肥力水平整体偏低;植被由北到南分布 依次为沙生植被、旱生草本、森林植被<sup>[20]</sup>,土壤和植被 综合影响着土壤全氮的水平分布。小尺度上,受植被类 型的影响,不同林份类型下的土壤全氮的分布呈现较大



## 图 3 典范对应分析排序图



0—20cm 深度土壤全氮含量,Total nitrogen (TN)1;20—40cm 深度 土壤全氮含量,Total nitrogen (TN)2;40—60cm 深度土壤全氮含 量,Total nitrogen (TN)3;60—80cm 深度土壤全氮含量,Total nitrogen (TN)4;80—100cm 深度土壤全氮含量,Total nitrogen (TN)5;归一化植被指数,Normalized difference vegetation index (NDVI)

的差别<sup>[21]</sup>;大尺度上,植被群落表现出明显的地域性特征,土壤全氮受到植被地带性分布的影响更加明显<sup>[22]</sup>。刘庆生等<sup>[23]</sup>研究指出内蒙古地区的地带性土壤及植被与土壤全氮的分布紧密相关,尤其是植被覆盖度、植物种类数量、土壤有机质等分布均与土壤全氮显著相关,这均验证了本研究的结论。

就土壤全氮的垂直分布而言,随土壤深度的增加全氮的累积量也逐渐降低,这也与其他学者的相关研究 结果相一致<sup>[24]</sup>,受地表植被的影响,表层土壤最先受到枯落物分解后的补给,因此表层土壤的氮素累积最丰

富。就其空间变异特征而言,受土壤深度的影响,表层土壤的空间变异受随机性因素的影响更加明显,同时深 层土壤的空间自相关距离逐渐增加,刘合满等<sup>[25]</sup>同样研究指出表层土壤受到外界侵蚀、温度、湿度以及植被 条件的差异,导致其氮素的矿化速度在空间上的不均一性更加明显,而深层土壤在深厚土层的封闭下,处在相 对均质稳定的环境中,因此更易于保持空间自相关关系。这也解释了表层土壤的空间变异性更强的原因。 3.2 影响土壤全氮空间分布的主导因素

本研究指出在不同土层上影响土壤全氮空间分布的主导因素也存在较大差异,土壤粘粒和 NDVI 与表层 土壤的相关性更高,海拔对 60 cm 以下土壤的影响更高。NDVI 反映了地表植被的覆盖及生长状态,不同的植 被类型的土壤氮矿化速率差异显著,特别是在表层土壤的表现更加明显[26],苏静等[27]研究也指出土壤团聚 体和植被恢复对土壤氮素的累积都发挥了积极作用,从土壤侵蚀角度分析,表层植被覆盖和良好的土壤团粒 结构都能够有效控制土壤全氮随降雨径流的流失[28],而深层土壤更接近基岩和土壤母质,同时受压实作用的 影响土壤的团粒结构较差,植被对深层土壤的补给以及微生物的活动相对表层土壤均较差,这也就使得土壤 粘粒和 NDVI 难以在深层土壤与土壤全氮建立更加紧密的联系。

研究区海拔在 300—1250 m 之间,研究表明海拔和土壤全氮含量呈现正相关关系,这一结论也和和其他 学者的研究相符<sup>[29]</sup>。而本研究发现深层土壤全氮含量和海拔的相关性更加明显,这可能与海拔直接影响土 壤温度有密切关系<sup>[30]</sup>,特别在本研究区海拔相对高差近1000m,深层土壤温度的升高积极影响着土壤微生物 数量、种类,台喜生等[31]研究指出土壤硝化细菌、反硝化细菌和固氮细菌在高海拔处土壤发育与低海拔处深 层土壤的早期发育相类似,氮循环细菌数量的变化受到海拔主导下植被和土壤理化因子的共同作用。这也说 明了海拔在影响深层土壤氮累积中具有明显的作用。

## 4 结论

研究区 0—100 cm 土壤深度范围内的全氮的平均含量在 0.43—0.68 g/kg 之间,随着土壤深度的增加逐 级递减,各层土壤全氮含量均呈现出南高北低的分布特征,低值区集中呈片状分布在研究区的东北部,高值区 呈岛状分散于研究区的南部区域。

各层土壤全氮均属于中等强度的空间相关性,结构性因素与随机性因素共同作用影响着土壤全氮的空间 变异结构,随着土壤深度的增加,随机因素对全氮空间变异的影响作用逐渐减弱,其空间最大自相关距离也随 着土壤深度的增加而逐渐减小。

各环境因素对土壤全氮含量的影响程度由高到低表现为海拔>NDVI>粘粒含量>土壤容重>坡度。其中 土壤粘粒和 NDVI 与表层土壤的相关性更高,海拔对 60 cm 以下土壤的影响更高。

#### 参考文献(References):

- [1] Guan F Y, Xia M P, Tang X L, Fan S H. Spatial variability of soil nitrogen, phosphorus and potassium contents in Moso bamboo forests in Yong'an City, China. CATENA, 2017, 150: 161-172.
- [2] Wang S, Zhuang Q L, Wang Q B, Jin X X, Han C L. Mapping stocks of soil organic carbon and soil total nitrogen in Liaoning Province of China. Geoderma, 2017, 305: 250-263.
- [3] 代子俊,赵霞,李德成,刘峰,石平超,庞龙辉.近30年湟水流域土壤全氮时空变异及影响因素.土壤学报,2018,55(2):338-350.
- [4] Weintraub S R, Taylor P G, Porder S, Cleveland C C, Asner G P, Townsend A R. Topographic controls on soil nitrogen availability in a lowland tropical forest. Ecology, 2015, 96(6): 1561-1574.
- [5] 宋彦彦,张言,赵忠林,管清成,李英爱,徐丽娜.长白山西部不同林型土壤有机碳和全氮的分布特征.西北林学院学报,2018,33(3): 39-44.
- [6] 张祎,任宗萍,李鹏,时鹏,蒋凯鑫,马田田,肖列,赵宾华.黄土丘陵区小流域生态恢复对土壤有机碳和全氮的影响.水土保持学报, 2018, 32(1): 97-103.
- [7] Masvaya E N, Nyamangara J, Descheemaeker K, Giller K E. Tillage, mulch and fertiliser impacts on soil nitrogen availability and maize production in semi-arid Zimbabwe. Soil and Tillage Research, 2017, 168: 125-132.

1578

- [8] Berhe A A, Torn M S, Harden J W. Soil nitrogen storage and stabilization in eroding landscapes. Biogeochemistry, 2017, 132(1): 37-54.
- [9] Meyer N, Welp G, Rodionov A, Borchard N, Martius C, Amelung W. Nitrogen and phosphorus supply controls soil organic carbon mineralization in tropical topsoil and subsoil. Soil Biology and Biochemistry, 2018, 119: 152-161.
- [10] 郑然,郑宝林. 冀北栗钙土区耕层土壤有机质和全氮的空间变异特征. 干旱区资源与环境, 2018, 32(5): 123-129.
- [11] 曹祥会,龙怀玉,周脚根,邱卫文,雷秋良,刘颖,李军,穆真.河北省表层土壤有机碳和全氮空间变异特征性及影响因子分析.植物营养与肥料学报,2016,22(4):937-948.
- [12] 李启权, 岳天祥, 范泽孟, 杜正平, 陈传法, 卢毅敏. 中国表层土壤全氮的空间模拟分析. 地理研究, 2010, 29(11): 1981-1992.
- [13] Dwivedi D, Riley W J, Torn M S, Spycher N, Maggi F, Tang J Y. Mineral properties, microbes, transport, and plant-input profiles control vertical distribution and age of soil carbon stocks. Soil Biology and Biochemistry, 2017, 107: 244-259.
- [14] Fierer N, Allen A S, Schimel J P, Holden P A. Controls on microbial CO<sub>2</sub> production: a comparison of surface and subsurface soil horizons. Global Change Biology, 2003, 9(9): 1322-1332.
- [15] 张保刚,梁慧春. 草地土壤机械组成研究综述. 辽宁农业科学, 2009, (6): 38-41.
- [16] Matheron G. Principles of geostatistics. Economic Geology, 1963, 58(8): 1246-1266.
- [17] Gamma Design Software. GS<sup>+</sup> Version 7. Geostatistics for the Environmental Sciences. User's Guide. Plainwell: Gamma Design Software, 2004: 160-160.
- [18] 全国土壤普查办公室.中国土壤普查数据.北京:中国农业出版社,1997.
- [19] Nielsen D R, Bouma J. Soil Spatial Variability. Netherlands: Pudoc Wageningen, 1985.
- [20] 李龙,姚云峰,秦富仓,郭月峰,高玉寒,张美丽.半干旱区县域尺度土壤有机碳的空间变异特征.生态学杂志,2016,35(8): 2003-2008.
- [21] 王勇辉. 艾比湖湿地七种植被类型土壤全氮分布特征研究. 土壤通报, 2017, 48(2): 413-419.
- [22] 黄先飞,张习敏,敖国富,秦樊鑫,张珍明.黔北发电厂周边林地植物群落结构及土壤碳、氮、磷分布特征.北方园艺,2017,(6): 164-171.
- [23] 刘庆生,刘高焕,黄翀,姚治君,黄河清.蒙古高原乌兰巴托-丰镇草地样带植被与土壤属性的空间分布.资源科学,2016,38(5): 982-993.
- [24] 马坤,张颖,唐素贤,刘俊国.若尔盖高寒湿地土壤全氮空间分布特征.生态学杂志,2016,35(8):1988-1995.
- [25] 刘合满,曹丽花,曾加芹.藏东南色季拉山沟壑区土壤氮素空间分布特征.生态学报,2016,36(1):127-133.
- [26] Zhang J B, Zhu T B, Cai Z C, Müller C. Nitrogen cycling in forest soils across climate gradients in Eastern China. Plant and Soil, 2011, 342(1/2): 419-432.
- [27] 苏静,赵世伟.植被恢复对土壤团聚体分布及有机碳、全氮含量的影响.水土保持研究,2005,12(3):44-46.
- [28] 赵敏慧,杨树华,王宝荣.不同植被类型对土壤全氮随降雨径流流失的控制研究——以抚仙湖流域磷矿开采区为例.云南地理环境研究,2006,18(4):20-26.
- [29] 武小钢,郭晋平,田旭平,杨秀云.芦芽山亚高山草甸、云杉林土壤有机碳、全氮含量的小尺度空间异质性.生态学报,2013,33(24): 7756-7764.
- [30] 冯学民,蔡德利. 土壤温度与气温及纬度和海拔关系的研究. 土壤学报, 2004, 41(3): 489-491.
- [31] 台喜生,杨秀丽,刘光琇,薛林贵,张勇,陈拓,张威,伍修锟,毛文梁.祁连山不同海拔氮磷循环细菌数量变化特征.冰川冻土,2014, 36(1):214-221.