DOI: 10.5846/stxb201407241502

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): - . Liu H M, Cao L H, Zeng J Q.Spatial Distribution of Soil Nitrogen in Gully Hillsides of Sejila Mountain, Southeastern Tibet.Acta Ecologica Sinica,2016,36(1): - .

藏东南色季拉山沟壑区土壤氮素空间分布特征

刘合满*,曹丽花,曾加芹

西藏大学农牧学院,林芝 860000

摘要:本研究以西藏东南部色季拉山海拔 3950—4350 m 为研究区,采用 30×50 m 网格采样法,以地统计学半变异函数为工具, 研究了色季拉山森林生态系统沟谷与坡面上土壤氮素空间变异特征及模型。结果表明:土壤全氮、硝态氮和铵态氮含量均表现 为 0—10 cm>10—20 cm,两个层次上空间变异性表现为全氮和铵态氮 0—10 cm>10—20 cm,而硝态氮表现为 10—20 cm>0— 10 cm;不同海拔高度土壤氮含量表现为随着海拔高度的升高而增加,但这种海拔梯度效应并未达显著水平(P>0.05);沟谷区土 壤氮含量高于坡面,这可能与植被残体在沟谷区的堆积分解促进氮循环有关;土壤全氮、铵态氮和硝态氮均具有中等程度的空 间依赖性,其中土壤全氮空间变异符合指数模型,块金值/基台值为 50%;土壤铵态氮和硝态氮含量空间变异分布均符合高斯模 型,块金值/基台值分别为 70.91%和 37.45%;该区域土壤全氮、铵态氮和硝态氮含量空间依赖性表现为:硝态氮>全氮>铵态氮, 即土壤硝态氮更易受到空间结构因素的影响,而铵态氮含量空间变化则主要受随机因素的影响。

关键词:色季拉山;全氮;硝态氮;铵态氮;空间变异

Spatial Distribution of Soil Nitrogen in Gully Hillsides of Sejila Mountain, Southeastern Tibet

LIU Heman*, CAO Lihua, ZENG Jiaqin

Agricultural and Animal Husbandry College of Tibet University, Linzhi860000, China

Abstract: Nitrogen (N) is one of the most important nutrients for plant growth, yet it has high spatial variability because of the effects of topography, climate, and vegetation. Therefore, it is critical to demonstrate and model the distribution of N to enhance our understanding of N variability and related factors. We used Sejila Mountain (elevation of approximately 3, 950—4,350 m) in southeastern Tibet as a model area to examine the spatial pattern of N distribution. We applied a 30 × 50-m grid sampling method and the geostatistical semivariogram analysis to study the spatial variability and distribution of the soil total N (TN), nitrate-N (NN), and ammonium-N (AN) in both valleys and slopes of the Sejila Mountain. The TN, NN, and AN contents in the 0—10cm layer were higher than those in the 10—20cm layer: (3.40 ± 1.19) g/kg and (2.32 ± 0.50) g/kg, respectively, for TN (P < 0.05); (360.55 ± 97.72) mg/kg and (273.15 ± 64.97) mg/kg, respectively, for AN (P < 0.01); and (98.45 ± 22.00) mg/kg and (83.72 ± 33.52) mg/kg, respectively, for NN (not significantly different). AN comprises a greater fraction of the mineral N than NN, and in the 0—10cm layer, the proportions of AN and NN were (78.16 ± 3.97)% and (21.84 ± 3.97)%, respectively. The spatial variability of TN and AN in the 0—10cm layer was higher than that in the 10—20cm layer was found for NN. The coefficients of variation in spatial distribution for TN, AN, and NN in 0—10cm and 10—20cm layers were 34.95% and 21.49% for TN, 27.10% and 23.78% for AN, and 22.35% and 40.04% for NN, respectively. The N content in 0—10cm and 10—

收稿日期:2014-07-24; 网络出版日期:2015-08-11

* 通讯作者 Corresponding author.E-mail: hmliu@ cau.edu.cn

基金项目:国家自然科学基金项目(41161052, 41461054, 41461055);中央高校基本科研业务费专项资金(中国农业大学-西藏大学农牧学院青 年教师科研合作培育专项);生态学学科学术团队能力提升项目资助

20cm layers increased with increasing elevation, but the increase was not significant (P > 0.05). The TN content showed a higher dependency on altitude in the 10—20cm layer than in the 0—10cm layer, whereas the opposite effect was found for NN and AN. The soil N contents in the valleys were higher than those on the slopes, which may have been related to high levels of accumulation and decomposition of vegetation residues in the gully areas. These results imply that the effects of microtopography should be considered when assessing the spatial heterogeneity of N. The distribution of soil TN, AN, and NN showed a moderate spatial correlation. The spatial variability of soil TN followed an exponential function model and the nugget: sill ratio was 50%. Gaussian models were the optimal models for AN and NN, and the nugget: sill ratios were 70.91% and 37.45% for AN and NN, respectively. The spatial autocorrelation of the soil TN, NN, and AN in the study area decreased from NN to TN and AN. The spatial variability of soil NN was affected more by spatial structural factors, whereas soil AN was affected by random factors.

Key Words: Sejila Mountain; total nitrogen; nitrate-nitrogen; ammonium-nitrogen; spatial variability

森林生态系统是受人为扰动相对较小的生态系统,其元素循环过程主要受气候、土壤、植被等自然因子的 影响,是研究土壤元素自然生态过程的良好场所。氮是影响和限制森林生态系统植被生长、苗木更新、生物多 样性及土壤生物过程等的重要因素,阐明氮素的空间变异特征对于区域空间氮素含量的预测、生态系统响应 的科学阐述都具有重要的科学意义。然而,在不同空间尺度上,土壤氮素含量和形态受空间微地形^[1]、土壤 质地、土壤立地条件等因素的影响,而使其具有非常复杂的空间分布模式^[2],这为正确评价和估算空间土壤 氮含量和动态特征带来了非常大的不确定性和挑战。

针对土壤这个极其复杂的多界面开放系统土壤元素的空间高度异质性的特征,科学界建立了以区域化变 量理论为基础,以变量半方差函数为主要工具的地统计学(Geostatistics),为研究土壤要素在空间分布上的随 机性和结构性,或空间相关和依赖性的自然现象提供科学工具,已在土壤学领域、环境科学等领域广泛应用。 Chien^[3]采用地统计学方法在 10 km²区域尺度上采用 250×250 m 网格采样法研究了台湾中西部农业土壤主要 性质的空间分布特征,并进行克里格插值验证空间模型可以极好地模拟土壤元素的空间分布。Gonzalez^[4]采 用 56×56 m 网格法对加勒比地区热带次生干旱森林土壤氮空间分布特征进行分析,发现土壤氮素的空间自 相关距离在 24 m 左右,展示了一个较强的空间相关性。Yavitt^[2]在 26.6 hm²区域尺度上研究巴拿马热带潮湿 森林 0—10 cm 层次土壤硝态氮含量空间分布符合指数函数模型,空间依赖尺度为 74.2 m,而铵态氮的空间分 布符合高斯模型,空间依赖性尺度为 111.3 m,即硝态氮较铵态氮具有更强的空间依赖性。

目前针对森林生态系统氮分布主要集中在海拔高度、气候条件、植被条件等影响因素方面,然而由于土壤 条件的空间高度异质性,而难以准确分析其分布格局,尤其在微地形差异较大的山区林地。本文选择西藏东 南部典型林区色季拉山为研究对象,分别在坡面和沟谷采集土壤样品进行土壤氮素空间分布特征研究,并采 用地统计学方法半方差函数对氮素空间分布进行拟合,以研究氮素空间分布模型,为区域森林生态系统氮分 布和循环研究提供科学依据。

1 研究区与研究方法

1.1 研究区域概况

色季拉山位于西藏林芝地区境内,地处雅鲁藏布江中下游,藏东南林区腹心地带,其地理位置为94°28′— 94°51′E,29°21′—29°50′N,最高海拔为5200m,是西藏主要林区之一。该区域具有非常丰富的气候类型,并 在水平和垂直地带性分布有着巨大的差异。区域气候为亚高山寒温带半湿润区,年均气温-0.73℃,最暖月(7 月)平均气温为9.8℃,最冷月(1月)平均气温为-13.8℃。

1.2 土壤样品采集与测定

于 2013 年 5 月 18 日,在色季拉山东坡,位于 29°39′ N,94°42′ E,海拔 3950—4350 m 的区域,选择一条沟

壑和两侧的坡面作为采样区,采用 30×50 m 网格法采样(图 1)。该区域土壤类型为山地淋溶灰化土,土壤质 地较粗,属砂质壤土。土壤表层覆盖较厚且不均匀的枯落物层,常年低温条件,导致植被枯落物分解非常缓 慢,O 层厚度可达 10 cm 以上。森林植被主要为急尖长苞冷杉林(Abies georgei var. smithii)与杜鹃林(Picea likiangensis var. linzhiensis)的混交林,树冠覆盖较密。在选择区域上,自 3950 m 高度开始,分别选择植被类型、 坡度基本一致的水平区域作为一个样带,每个样带间距离大约为 50 m。每个水平样带上分别在谷沟和两侧 坡面上各取一个样点,相邻两样点间间隔 30 m,每个样带采集 3 个样点,共设置 13 个样带,共采集 39 个样点。 在采集土壤样品时,首先去除地表 O 层未分解和半分解的植物残体,然后分 0—10 cm 和 10—20 cm 两个层次 采集土壤样品。将采集的土壤样品带回实验室内,去除可见的石块、植物残体等非土壤成分,自然风干磨碎供 分析土壤各项指标。土壤全氮采用半微量凯氏定氮法测定,硝态氮和铵态氮采用 2 mol/L KCl 浸提,连续流 动分析仪(AA3HR 型,德国 SEAL 公司)测定。

1.3 数据处理

土壤全氮、铵态氮和硝态氮含量数据空间变异性、 随海拔高度变化趋势分析采用 SPSS 20.0 进行,空间变 异模型及局部 kriging 插值分析采用地统计学软件 GS⁺ 9.0 进行。

不同层次土壤全氮、硝态氮和铵态氮的空间变异性 采用变异系数(Coefficient of Variation, C.V)进行评价, 变异系数越大则说明数据越分散,该指标的空间异质性 越高,其计算公式如式(1)。

变异系数(*C.V*) =
$$\frac{标准 \pm (S.D)}{$$
平均值(*MN*) × 100% (1)



Fig. 1 Sampling points

土壤氮素含量的空间依赖性采用空间模型的块金值

(C₀)与基台值(C+C₀)的比值进行评价,若该比值越高,说明随机部分引起的空间变异性程度越高,反之则说 明空间自相关部分引起的空间变异性程度越大。若该比值接近1,则说明该变量在整个尺度上具有恒定的变 异。当该比值<25%时,空间相关性强,比值在25—75%时空间相关性中等,该比值>75%时,空间相关 性弱^[5]。

2 结果与分析

2.1 土壤氮含量分布特征

2.1.1 不同层次分布特征

供试 0—10 cm 和 10—20 cm 两个层次上土壤氮素的空间分布特征如图 2 所示,由图可知,土壤全氮、铵态氮和硝态氮含量均表现为:0—10 cm>10—20 cm。

在 0—10 cm 层次土壤全氮含量为 3.40±1.19(S.D,下同)g/kg,数据具有相对较大的空间变异性,变异系数为 34.95%。10—20 cm 层次上全氮含量为(2.32±0.50)g/kg,数据空间变异相对较小,变异系数为 21.49%, 由供试两个层次土壤全氮含量的数据标准差和变异系数可知,全氮含量在 0—10 cm 层次上的空间变异大于 10—20 cm。0—10 cm 层次土壤全氮含量较 10—20 cm 高 47%,二者之间具显著性差异(*P*<0.05)。

0—10 cm 和 10—20 cm 层次土壤铵态氮含量分别为(360.55±97.72) mg/kg 和(273.15± 64.97) mg/kg, 数据变异系数分别为 27.10%和 23.78%,即铵态氮含量空间变异性表现为:0—10 cm>10—20 cm,与土壤全氮 变化规律一致。表层 0—10 cm 土壤铵态氮含量较 10—20 cm 高 32%,两个层次土壤铵态氮含量之间差异达 极显著水平(P<0.01)。

土壤硝态氮在供试区 0—10 cm 和 10—20 cm 层次上含量分别为(98.45±22.00) mg/kg 和(83.72±33.52)





Fig. 2 Soil TN, NN and AN contents

mg/kg,变异系数分别为 22.35%和 40.04%,由此可知,在空间尺度上土壤硝态氮含量在 0—10 cm 具有较小的 空间变异性。0—10 cm 和 10—20 cm 两个层次土壤硝态氮含量间差异并未达显著水平,0—10 cm 层次含量 较 10—20 cm 高 17.60%。

2.1.2 随海拔高度的变化特征

4

土壤全氮、铵态氮和硝态氮含量沿海拔高度变化而变化如图 2 所示,三者均表现为随着海拔高度的升高 而增加,但线性增加趋势均未达显著水平。在 0—10 cm 层次上,土壤全氮含量随海拔高度变化而变化的线性 趋势检验 P=0.19>0.05,线性趋势线斜率为 0.004,10—20 cm 上线性增加趋势线显著性检验 P=0.063>0.05, 线性趋势斜率为 0.0023。土壤铵态氮含量在 0—10 cm 层次上线性方程检验 P=0.08>0.05,趋势线斜率为 0. 4151;10—20 cm 层次上线性趋势方程检验 P=0.36>0.05,趋势线斜率为 0.1523,由此可知,土壤铵态氮在 0— 10 cm 层次上随海拔高度升高而增加的线性趋势较 10—20 cm 层次明显。土壤硝态氮含量在 0—10 cm 层次 上,随海拔高度而变化的趋势线斜率为 0.04,趋势线拟合未达显著水平 P=0.07>0.05。10—20 cm 层次上,拟 合趋势线斜率为 0.075,线性趋势检验 P=0.09>0.05,未达显著水平。

2.2 土壤氮含量空间变异特征

2.2.1 土壤全氮空间变异与插值分析

由于同一样点不同层次土壤氮素含量之间具有显著正相关关系,故在本研究中只对表层 0—10 cm 层次 上土壤氮含量的空间分布特征进行模拟分析。供试区域土壤全氮的半方差函数如图 3a 所示,该区域土壤全 氮的空间变异性符合指数函数模型。模型块金值 C₀=1.81,模型基台值 C+C₀=3.62,模型相关系数为 0.5079 (*P*<0.01)。由模型块金值 C₀与基台值 C₀+C 的比值(50%)可知,其比值在 25—75%之间,表明该区域内土壤 全氮含量具有中等程度的空间依赖性。



对研究区域土壤全氮含量的空间变化采用 kriging 插值法进行估值,如图 4 所示,由图可知,研究区域内, 土壤全氮含量均表现为沟壑区高,而两侧坡面位置较低,这可能与植被凋落物氮矿化作用有关。且在随着坡 面高度变化,土壤全氮含量变化表现为在供试区域坡面中部含量较高,而坡上部和下部较低。

5



图 4 土壤氮的 Kriging 插值分析 Fig. 4 Spatial distribution of Kriging estimated soil TN、AN and NN

2.2.2 土壤铵态氮空间变异与插值分析

经对供试土壤铵态氮进行正态检验分析去除了两个大离群值后,土壤铵态氮含量符合正态分布。然后对 土壤铵态氮含量进行半方差函数分析,可得如图 3 b 所示,由图可知,铵态氮含量空间变异特征符合高斯模 型,模型 r 值为 0.8228,模型检验达到极显著水平(P<0.01)。块金值与基台值比值为 70.91%,在 25—75%之 间,即土壤铵态氮具有中等程度的空间相关性。

对土壤铵态氮采用 Kriging 插值法进行估值分析后可得其在供试区的空间分布特征(图4),在空间分布 上土壤铵态氮同样表现出在地势较低的沟谷地带,土壤铵态氮含量高,而两侧的坡面位置含量相对较低。 2.2.3 土壤硝态氮空间变异与插值分析

经过对供试区 0—10 cm 层次上土壤硝态氮含量进行正态分布检验,在剔除离群值后符合正态分布,故进 行空间分布的地统计学分析。土壤硝态氮含量的半方差函数如图 3 c 所示,土壤硝态氮含量空间变异符合高 斯函数模型,空间分布块金值(C₀)/基台值(C₀+C)= 37.45%,即土壤硝态氮具有中等程度的空间相关性。通 过 Kriging 插值分析(图 4),可知该区域土壤硝态氮含量较高值主要分布在沟谷区,而坡面土壤硝态氮含量相 对较低。

3 讨论

1期

3.1 不同层次土壤氮含量空间变异特征

大量研究表明,森林生态系统土壤氮素含量主要表现为 0—10 cm>10—20 cm^[6-7],本研究中,供试区域土 壤全氮、铵态氮、硝态氮含量均表现为:0—10 cm>10—20 cm,即森林生态系统土壤氮素表现出一定的"表聚" 作用。同时表层 0—10 cm 土壤全氮、铵态氮含量空间变异性大于亚表层(10—20 cm),这与表层土壤更易受 到植物残体分解、大气氮沉降、氮的淋洗等关键氮循环过程有关。植物残体分解释放养分是土壤无机养分输 入和植物养分供给的一个重要途径,在全球养分循环方面起着非常重要的作用^[8-9],对欧洲 6 个主要树种枯 落物氮进行分析,研究发现每年枯落物氮含量在 35.2—69.2 kg/(hm².yr)之间^[10],林波^[11]等研究了川西地区 亚高山 40 a 人工云杉林凋落物可以归还土壤 N 素达到 82.01 kg/hm²。而植被枯落物分解氮释放首先作用于 表层土壤,故受不同采样点植被枯落物数量和质量差异的影响,不同区域 0—10 cm 层次土壤氮素含量具有更 大的空间差异,而亚表层 10—20 cm 则受地表植被枯落物分解的影响相对较小,而使氮含量具有相对小的空 间变异。大气干湿沉降也是森林生态系统氮输入的重要途径之一,不同采样点由于植被覆盖度不同而使地表 土壤接收沉降氮量也不同,而沉降氮首先作用于表层土壤,从而引起较大的表层土壤氮素的空间变异性。

由于海拔条件决定了大气温度、湿度和植被条件等,从而对土壤氮循环过程产生一定的影响,并影响土壤 氮形态、含量和有效性^[12-13]。但关于土壤氮素随海拔梯度的变化而变化的趋势研究结果不一致,有研究表明 土壤全氮含量随海拔的降低而降低^[14-15],也有研究表明土壤全氮在海拔高度上没有固定的变化趋势^[16]。本 研究中,土壤氮素表现为随海拔高度的升高而呈升高趋势,但线性相关趋势并未达显著水平,其中硝态氮含量 随海拔高度变化而升高的趋势明显优于土壤全氮和铵态氮。土壤全氮在研究区域中部坡位具有最高值,而在 坡上部和下部值均较小,这应与不同区域不同主导类型植被对土壤氮转化和吸收消耗有关。有研究表明,植 被类型对土壤氮矿化转化过程起着非常重要的作用^[17],针叶林土壤氮矿化速率显著低于阔叶林^[18],在该研 究区域上,坡中部主要为高大的松针林,而坡上部则主要为杜鹃林,中部针叶林土壤具有较低的氮矿化速率, 降低了氮的损失风险,从而使土壤具有相对较高的含氮量。

3.2 土壤无机氮含量特征

本研究中,土壤铵态氮占无机氮比例远高于硝态氮,0—10 cm 层次上土壤硝态氮占无机氮的比例平均为 (21.84±3.97)%,而铵态氮所占比例则为(78.16±3.97)%。这与大量学者研究结果一致,莫江明^[19]等研究鼎 湖山马尾松人工林土壤铵态氮所占全氮的比例远高于硝态氮,张学龙^[20]等也研究得到祁连山青海云杉林土 壤铵态氮是土壤有效氮的主要存在形式,所占比例在 70%以上,王光军^[21]等研究也表明铵态氮是森林土壤无 机氮的主体形态。一般地,在低 pH 值、缺氧环境条件下不利于铵态氮向硝态氮的转化,使铵态氮积累增加, 硝态氮含量较低。本研究中,供试区域土壤 pH 值为 4.90±0.65,为强酸性土壤,同时受高海拔缺氧等环境因 子的影响,使该区域土壤铵态氮含量表现出远高于硝态氮含量的规律。

3.3 土壤氮空间变异模型

本研究中,土壤全氮空间变异符合指数函数模型,而铵态氮和硝态氮的空间变异性符合高斯模型,且全氮、铵态氮和硝态氮均具有中等程度的空间依赖性。在不同区域和森林类型条件下,得到不同的土壤氮素空间分布模型,长白山阔叶红松混交林区域土壤全氮空间分布符合球状模型^[22],而长白山天然次生林土壤全氮含量符合指数函数模型^[23],与本研究结果一致。由土壤氮素空间分布块金值(C₀)与基台值(C₀+C)比值可知,土壤硝态氮含量空间依赖性最强,其次为全氮,空间依赖性最小的为铵态氮,其值分别为 37.45%、50%和 70.91%,即空间随机环境因子对土壤铵态氮含量影响程度大于其空间结构因素,这与土壤氮矿化转化为铵态氮敏感地响应于地表气候因子影响有关^[24],地表空间结构性又决定了地表土壤含水量、温度等因子,从而使土壤铵态氮含量具有更强的空间结构依赖性。

通过空间插值分析,可以得到土壤全氮、铵态氮和硝态氮均表现为沟谷区含量大于坡面,这应是植被凋落物的堆积分解及不同位置植被凋落物分解过程中氮矿化作用条件不一致所致。凋落物量是生态系统土壤氮的重要输入,决定着土壤有机氮库的大小^[25]。在沟谷区便于累积更多的枯落物,且具有高湿的分解条件,更有利于植物残体分解和氮素的释放。其次还可能与两侧坡面土壤在水溶淋洗的作用下养分更容易向地势较低的沟壑区转移,从而导致沟壑区养分含量较高有关。同时在小的空间尺度上,土壤氮净矿化速率和净硝化速率也主要受植物残体枯落物输入量的驱动^[4],故在不同位置植物残体数量不同,土壤硝态氮和铵态氮含量也表现出了沟谷区大于坡面的空间变化特征。然而山地森林生态系统由于其地形变化非常复杂,导致土壤表面不同的微环境条件,进一步影响地下土壤氮的物质过程,尤其是西藏高寒森林表层植被枯落物层的分解和氮释放对森林生态系统土壤氮含量、形态及迁移的影响效应及机制尚需进一步研究。

4 结论

(1) 土壤全氮、铵态氮和硝态氮含量均表现为 0—10 cm>10—20 cm, 且两个层次上的空间变异表现为全氮、铵态氮为 0—10 cm>10—20 cm, 而硝态氮的空间变异性表现为 10—20 cm>0—10 cm;

(2)土壤全氮、硝态氮和铵态氮含量在两个供试层次上均表现为随着海拔高度升高而震荡增加的趋势, 但线性增加趋势均未达显著水平;

(3)土壤全氮、铵态氮和硝态氮均具有中等程度的空间依赖性性,其中全氮空间变异符合指数函数模型 而铵态氮和硝态氮空间变异符合高斯模型;土壤全氮、铵态氮和硝态氮含量空间依赖性表现为:硝态氮>总氮 >铵态氮,即土壤铵态氮含量空间变异更易受到随机因素的影响,硝态氮更易受到结构因素的影响。

参考文献(References):

- [1] Šamonil P, Valtera M, Bek S, Šebková B, Vrška T, Houška J. Soil variability through spatial scales in a permanently disturbed natural spruce-firbeech forest. European Journal of Forest Research, 2011, 130(6); 1075-1091.
- [2] Yavitt J B, Harms K E, Garcia M N, Wright S J, He F, Mirabello M J. Spatial heterogeneity of soil chemical properties in a lowland tropical moist forest, Panama. Soil Research, 2009, 47(7): 674-687.
- [3] Chien Y J, Lee D Y, Guo H Y, Houng K H. Geostatistical analysis of soil properties of mid-west Taiwan soils. Soil Science, 1997, 162(4): 291-298.
- [4] Gonzalez O J, Zak D R. Geostatistical analysis of soil properties in a secondary tropical dry forest, St. Lucia, West Indies. Plant and Soil, 1994, 163(1): 45-54.
- [5] Cambardella C A, Moorman T B, Parkin T B, Karlen D L, Novak J M, Turco R F, Konopka A E. Field-scale variability of soil properties in central Iowa soils. Soil Science Society of America Journal, 1994, 58(5): 1501-1511.
- [6] Peng G, Wang B, Geng G P, Zhang G C. Spatial distribution of soil organic carbon and total nitrogen based on GIS and geostatistics in a small watershed in a hilly area of northern China. PLoS One, 2013, 8(12); e83592.
- [7] 邢肖毅,黄懿梅,安韶山,张宏.黄土高原沟壑区森林带不同植物群落土壤氮素含量及其转化.生态学报,2013,33(22):7181-7189.
- [8] Manzoni S, Jackson R B, Trofymow J A, Amilcare P. The global stoichiometry of litter nitrogen mineralization. Science, 2008, 321 (5889): 684-686.
- [9] Manzoni S, Trofymow J A, Jackson R B, Porporato A. Stoichiometric controls on carbon, nitrogen, and phosphorus dynamics in decomposing litter. Ecological Monographs, 2010, 80(1): 89-106.
- [10] Vesterdal L, Schmidt I K, Callesen I, Nilsson L O, Gundersen P. Carbon and nitrogen in forest floor and mineral soil under six common European tree species. Forest Ecology and Management, 2008, 255(1): 35-48.
- [11] 林波,刘庆,吴彦,庞学勇,何海.川西亚高山针叶林凋落物对土壤理化性质的影响.应用与环境生物学报,2003,9(4):346-351.
- [12] Zhang S H, Chen D D, Sun D S, Wang X T, Smith J L, Du G Z. Impacts of altitude and position on the rates of soil nitrogen mineralization and nitrification in alpine meadows on the eastern Qinghai-Tibetan Plateau, China. Biology and Fertility of Soils, 2012, 48(4): 393-400.
- [13] Averill C, Finzi A. Increasing plant use of organic nitrogen with elevation is reflected in nitrogen uptake rates and ecosystem δ^{15} N. Ecology, 2011, 92(4): 883-891.
- [14] 傅华, 裴世芳, 张洪荣. 贺兰山西坡不同海拔梯度草地土壤氮特征. 草业学报, 2005, 14(6): 50-56.
- [15] 胡宗达,刘世荣,史作民,刘兴良,何飞.不同海拔梯度川滇高山栎林土壤颗粒组成及养分含量.林业科学,2012,48(3):1-6.
- [16] 柏松,黄成敏,唐亚.岷江上游干旱河谷海拔梯度上的土壤发生特征.土壤,2008,40(6):980-985.
- [17] Lovett G M, Weathers K C, Arthur M A, Schultz J C. Nitrogen cycling in a northern hardwood forest: Do species matter?. Biogeochemistry, 2004, 67(3): 289-308.
- [18] 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.
- [19] 莫江明, 郁梦德, 孔国辉. 鼎湖山马尾松人工林土壤硝态氮和铵态氮动态研究. 植物生态学报, 1997, 21(4): 335-341.
- [20] 张学龙,赵维俊,车宗玺.祁连山青海云杉林土壤氮的含量特征.土壤,2013,45(4):616-622.
- [21] 王光军, 田大伦, 朱凡, 闫文德, 李树战. 湖南省 4 种森林群落土壤氮的矿化作用. 生态学报, 2009, 29(3): 1607-1615.
- [22] Zhao J, Zhang J. Spatial variability of soil total nitrogen in a natural broad-leaved Korean pine mixed forest//2011 International Symposium on Water Resource and Environmental Protection (ISWREP). Xi'an; IEEE, 2011, 3: 1682-1685.
- [23] Wang Y L, Zhang M, Zhang X K, Wang X G, Liang W J. Geostatistical analysis of soil total nitrogen in natural and secondary forests of Changbai Mountain, China. Advanced Science Letters, 2012, 11(1): 106-109.
- [24] Guntinas M E, Leirós M C, Trasar-Cepeda C, Gil-Sotres F. Effects of moisture and temperature on net soil nitrogen mineralization: A laboratory study. European Journal of Soil Biology, 2012, 48: 73-80.
- [25] 陈伏生, 曾德慧, 何兴元. 森林土壤氮素的转化与循环. 生态学杂志, 2004, 23(5): 126-133.