

秦岭火地塘林区土壤剖面碳氮垂直分布规律的研究

李珊珊, 耿增超*, 姜林, 余雕, 罗志伟

(西北农林科技大学 资源环境学院, 陕西 杨陵 712100)

摘要:采用野外采样、室内分析并结合相关的方法,探讨了火地塘林区土壤碳、氮的垂直分布规律。结果表明:供试土壤碳、氮含量随深度的增加而减少;A层的碳、氮含量比B、C层高,且差异显著,A层有机碳含量最高可达 $68.10\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,而C层最低,只有 $2.61\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$;同一剖面随着深度的增加,A层碳、氮含量最高,而B、C层之间含量变化不大,差异性明显减小;土壤碳氮比均小于25:1,随着海拔升高先增加后减少,在土壤剖面中的分布随海拔不同而有所差异。因气候特征、林分类型和土壤类型的不同,土壤碳氮、含量垂直分布差异较大。层间差异显著,显著性沿剖面减小。
关键词:秦岭;火地塘林区;有机碳;全氮;铵态氮;硝态氮;垂直分布

中图分类号:S714.2 文献标志码:A 文章编号:1001-7461(2011)04-0001-06

Vertical Distribution of Carbon and Nitrogen at Huoditang Forest Region in the Qinling Mountains

LI Shan-shan, GENG Zeng-chao*, JIANG Lin, SHE Diao, LUO Zhi-wei

(College of Resources and Environment, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: The vertical distribution of soil carbon and nitrogen Huoditang was examined through laboratory analysis and mathematical statistics method. The results showed that the contents of carbon and nitrogen of the tested soils decreased with increase of depth; the contents of carbon and nitrogen of A horizon were higher than horizon B and C, and the difference were significant. The highest content of A horizon was $68.10\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$, but the lowest content of C horizon was only $2.61\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$. In the same profile, with the increase of depth, the contents of carbon and nitrogen of A horizon were highest, the contents between horizon B and C changed little and the difference decreased obvious. Generally soil C/N was less than 25:1. It climbed up and then declined with the increase of altitude, but varied with the altitude in the soil profile. Due to the difference of climatic characteristics, forest types and soil types, the vertical distribution of carbon and nitrogen were different. The contents of carbon and nitrogen of the tested soils decreased from the top soil of the profiles to the basement soil, and the difference between any two layers were significant, but the significance decreased along the profiles.

Key words: Qinling Mountains; Huoditang forest region; SOC; TN; $\text{NH}_4^+\text{-N}$; $\text{NO}_3^-\text{-N}$; vertical distribution

森林土壤中的碳占全球土壤有机碳的73%^[1],而森林土壤的氮素储量超过森林生态系统总氮量的85%^[2]。土壤有机质和氮素是土壤肥力的重要物质基础,对于土壤生产力和土地可持续利用及环境保

护等有着重要作用^[3]。土壤有机碳和全氮是衡量土壤肥力水平的重要指标,土壤碳、氮资源的总量和可获得性较低,碳氮资源中的氮已经成为制约森林生产力提高的主要限制因子。作为陆地碳库的主要部

收稿日期:2010-07-27 修回日期:2010-09-10
基金项目:科技部科技基础性工作专项森林土壤资源调查及标本搜集(2007FY210300)
作者简介:李珊珊,女,硕士研究生,主要从事土壤特性及系统分类方面的研究。
*通讯作者:耿增超,男,教授,硕士生导师,主要从事森林土壤及农林废弃物转化方面的研究。

分,森林土壤有机碳主要贮存于林下枯落物和表层土壤中^[4],对气候变化较为敏感^[5]。气候改变导致的表层土壤碳库的微小变化可能造成全球 CO₂ 通量的显著变化^[6-7],因此,森林土壤有机碳在全球碳循环中起着重要作用^[8-9]。在森林生态系统中,生物对氮的需求量往往大于土壤有机氮矿化速率,所以森林生态系统通常表现为氮缺乏型^[10]。

在一定含量范围内,全氮和有机质含量的多少,反映了土壤肥力的高低^[11]。揭示土壤全氮和有机质的空间变异规律和分布特征对于实现土壤资源的合理利用和可持续发展具有重要意义^[12]。森林在全球碳氮循环中有着重要的地位,是重要的碳源或碳汇,而土壤又是森林生长的物质基础,因此研究森林土壤碳氮过程,对于了解森林生态系统碳氮循环,从而进一步弄清森林生态系统与全球变化的关系有着重要意义^[13]。对于秦岭火地塘林区,相关方面的研究较少,特别是土壤中铵态氮和硝态氮的变化规律至今无人报道。为此,本文在前人研究的基础上,对该林区不同海拔高度的土壤进行碳、氮养分状况的研究,以期能对火地塘林区森林土壤碳氮分布规律和林业生产提供更为详细的基本数据。

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

火地塘林区位于秦岭南坡中山地带中部,地处陕西省宁陕县境内,属汉江中上游支流子午河水系。林区面积 22.25 km²,海拔 1 470~2 473 m,坡度 30°~35°。气候为暖温带湿润山地气候,年均气温 8~12℃,多年平均降水量 1 130 mm,主要集中于 7—9 月。林区土壤主要为棕色森林土(又名棕壤),平均厚度 50 cm,成土母岩主要为花岗岩、片麻岩、变质砂岩和片岩。除棕壤外,还有黄棕壤、暗棕壤、沼泽土等土壤类型。选取不同海拔高度的 10 个典型土壤剖面,包括棕壤,暗棕壤和黄棕壤 3 种土壤类型。

1.2 分析样品的采集与处理

分别在火地塘林场附近不同海拔地区选定 10 个标准地块(表 1),在每个地块按照 S 形布点法确定采样点;每个采样点按土壤的发生层次逐层采样,最后将每个地块内各剖面土壤样品按层混合,NH₄⁺-N 和 NO₃⁻-N 的测定采用新鲜土壤样品,其余样品经风干后,分别磨细并通过孔径为 1 mm 和 0.25 mm 的筛子,以备分析用。

表 1 标准地概况一览表
Table 1 A survey of the plots

剖面编号	采样地点	海拔/m	主要植物	坡度/°	坡向	土壤类型
1	老气象站山坡上部	1 840	铁橡树(<i>Quercus spinosa</i>)、华山松(<i>Pinus armandii</i>)、锐齿栎(<i>Quercus alienavari acuteserrate</i>)	21	西北坡	棕壤
2	老气象站附近	1 596	油松(<i>Pinus tabulaeformis</i>)、落叶松(<i>Larix pinaceae</i>)、锐齿栎、莎草(<i>Cyperus microiria</i>)	38	西南坡	棕壤
3	林场场部对面	1 777	锐齿栎、华山松、白檀(<i>Symplocos paniculata</i>)、苔草(<i>Carex bronzita colorgrass</i>)	26	西北坡	棕壤
4	板桥沟	1 515	锐齿栎、胡桃(<i>Juglans regia</i>)、胡颓子(<i>Elaeagnus pungens</i>)	32	东南坡	棕壤
5	平河梁	2 340	华北落叶松(<i>Larix principis-rupprechtii</i>)、红桦(<i>Betula albo-sinensis</i>)	12	西南坡	暗棕壤
6	平河梁	2 268	华北落叶松	47	西南坡	暗棕壤
7	平河梁	2 560	箭竹(<i>Fargesia spathacea</i>)	5	西南坡	暗棕壤
8	平河梁	2 450	红桦、箭竹	20	西北坡	暗棕壤
9	宁陕城关	1 030	板栗(<i>Castanea mollissima</i>)、锐齿栎、盐肤木(<i>Rhus chinensis</i>)	15	西南坡	黄棕壤
10	宁陕米家咀	770	农田	16	西南坡	黄棕壤

1.3 分析指标及方法

SOC 采用 $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ 氧化—外加加热法^[14-16]；
TN 采用半微量凯式法^[14-16]；
 NH_4^+-N 采用 $1\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}\text{KCl}$ 浸提—流动分析
仪法^[14-16]；
 NO_3^--N 采用 $1\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}\text{KCl}$ 浸提—流动分析
仪法^[14-16]。

1.4 数据处理

采用 EXCEL 进行基本的数据处理,DPS 软件
中的 LSD 多重比较方法进行分析。

2 结果与分析

不同土壤类型具有不同的成土过程、发育程度及
耕作管理措施,因此造成土壤特性在不同土壤类型
间存在差异^[17]。随着海拔和植物群落的不同,土壤
全氮和有机质的变化规律有相似的趋势,即从 A 层
向 C 层递减(表 2),供试土壤 A 层全氮含量为 $1.00\sim$
 $2.00\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,只有剖面 2 和 8 超过 $3.00\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,

表 2 供试土壤的碳氮含量

Table 2 Carbon and nitrogen content of the experimental soils						
剖面 编号	土层	有机碳/ ($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)	全氮/ ($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)	铵态氮/ ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)	硝态氮/ ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)	C/N
1	A	46.63	2.11	45.90	0.92	22.07
	B	11.97	0.51	4.77	0.44	23.64
	C	4.20	0.27	0.44	0.26	15.69
2	A	68.10	3.37	24.79	1.05	20.21
	B	3.46	0.34	1.86	0.82	10.32
	C	3.24	0.30	0.94	0.09	10.68
3	A	32.97	1.74	28.82	2.65	18.91
	B	4.27	0.29	2.91	1.38	14.68
	C	4.07	0.28	2.78	0.92	14.36
4	A	32.27	2.10	11.00	6.40	15.38
	B	16.91	1.22	7.71	2.81	13.90
	C	2.75	0.30	2.54	2.51	9.08
5	A	20.61	1.96	12.41	5.20	10.52
	B	8.95	0.96	7.90	3.08	9.37
	C	2.61	0.28	5.69	1.91	9.20
6	A	23.81	1.84	16.95	2.59	12.93
	B	15.07	1.11	16.73	2.27	13.53
	C	5.81	0.30	4.74	1.13	19.52
7	A	21.01	2.10	17.01	5.91	10.02
	B	13.52	1.06	12.52	4.87	12.73
	C	8.45	0.48	10.21	2.90	17.62
8	A	57.56	4.10	24.07	2.29	14.04
	B	20.44	1.26	15.16	1.90	16.20
	C	18.46	0.80	13.89	1.86	23.22
9	A	35.25	1.87	10.31	5.50	18.81
	B	3.67	0.23	0.24	2.24	15.96
	C	3.28	0.22	0.24	1.96	14.91
10	A	18.82	1.06	8.56	3.29	17.75
	B	7.70	0.46	6.83	2.70	16.74
	C	5.14	0.36	1.27	2.18	14.28

而有机碳的含量则相对较高,表层含量有的高达
 $68.10\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,下层最低含量也有 $2.61\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。
但是,土壤碳氮比随着海拔升高先增加后减少,在土
壤剖面中的分布随海拔不同而有所差异。这一结论
与薛晓娟等^[18]人的研究结论一致。从表 2 还可以
看出,供试土壤的铵态氮含量明显高于硝态氮含量,
前者最高达到 $45.90\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,后者最高仅为 6.40
 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。

由上述数据进行统计分析。

2.1 供试土壤各层有机碳含量

由图 1 可知,供试土壤样品的 A 层有机碳含量
明显高于 B、C 层,分别高出 $33.44\%\sim1\ 868.79\%$
和 $131.34\%\sim1\ 999.14\%$,且差异显著,进一步做极
显著水平分析可知,A 层的有机碳含量与 B、C 两层
差异极显著。供试 10 个土壤剖面中,剖面 2 和 8 的
表层土壤有机碳含量最高,均超过 $57.56\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,
有机碳表聚现象非常明显。而 B、C 两层的土壤有
机碳含量差异性显著的有 8 个剖面,另 2 个剖面的
差异性不显著。由此可知,随着土壤深度的增加,有
机碳的含量呈现下降的趋势,对于有些剖面,下降的
趋势更加明显,甚至会出现有机碳的表聚现象,主要
是由于森林土壤有机质主要靠高大的木本植物枯枝
落叶归还土壤,主要聚集在表层。枯枝落叶层较厚,
气温较低,有利于土壤有机质的积累,而有机碳占有
有机质的 58% 左右且具有显著的相关性,因此这与有
机质的表聚现象相吻合。

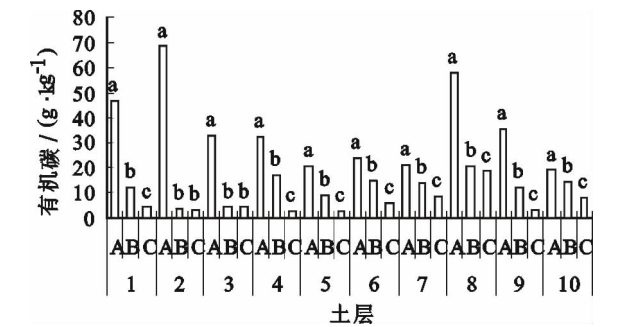


图 1 土壤的有机碳含量及差异显著性
Fig. 1 Organic carbon content and
significant difference of the experimental soils

不同土壤类型间,其化学性质具有较大差异,这
种差异主要是由其成土过程中的环境特点及植被类
型等方面不同所引起^[19]。国外的一些研究结果也
表明,土壤有机碳的积累受诸多因素的影响,如气
候、土壤、土地利用状况、土壤耕作状况、枯落物层
厚度、土壤微生物等,这些因素影响到输入土壤有机
质的质量和时空分布、土壤呼吸和矿化速率、土壤
温度、土壤 pH 和离子交换能力等,从而在不同程度

影响土壤碳储量的动态^[20-21]。

2.2 供试土壤各层全氮含量

从图 2 中可以看出,供试土壤样品的 A 层全氮含量明显高于 B、C 两层,分别高出 65. 37%~905. 50% 和 257. 94%~1 008. 83%,且差异显著。供试 10 个土壤剖面中,剖面 2 和 8 的表层土壤全氮量最高,均超过 3. 37 g · kg⁻¹,这一趋势与有机碳的变化一致。而 B、C 两层的土壤全氮含量差异显著的有 7 个剖面,另 3 个剖面的差异不显著。分析原因,可能是地形和土壤类型的影响,剖面 1~4 为棕壤,5~8 为暗棕壤,9 和 10 为黄棕壤,其中暗棕壤海拔最高,人为干扰小,枯枝落叶量多,而黄棕壤海拔最低,土地利用强度大,枯枝落叶量少,棕壤介于两者之间,因此全氮含量的高低表现为暗棕壤>棕壤>黄棕壤。

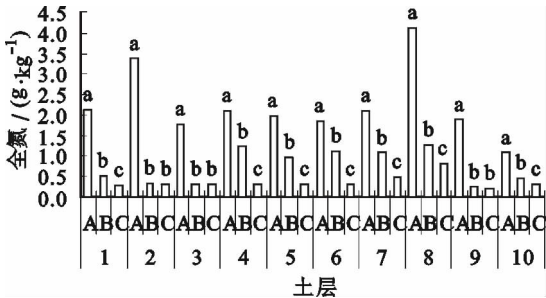


图 2 土壤的全氮含量及差异显著性

Fig. 2 Total N content and significant difference of the experimental soils

同一森林类型中,土壤上、中、下 3 层的全氮含量依次减少,这归因于土壤氮素来源于有机质,而林地土壤的有机质主要来自于地表枯枝落叶层的分解与累积。有机质在土壤剖面中的分布取决于土壤有机物质和腐殖质在下渗水作用下在土体中的淋溶、迁移、淀积以及其在土壤微生物作用下与矿质土土体扰动、混合的过程。表层土是植物根系分布的集中层,供应植株生长的主要养分层,因而林地土壤有机质及腐殖质组分以表土中为最高,向下迅速减少^[22]。这一结论与荣兴民等人的观点一致,即不同地理位置的森林,由于其水热状况的差异,经过长期的演替,其物种结构、物种多样性以及优势植物种群都有着各自的特点。大量的研究表明,林型不同,其土壤凋落物分解动态、土壤碳氮矿化等过程有着很大的差别^[13]。

2.3 供试土壤各层铵态氮含量

由图 3 可以看出,供试土壤样品(剖面 6 除外)的 A 层铵态氮含量极显著高于 B、C 两层。剖面 6 的 A 层和 B 层差异不显著,而与 C 层差异显著。

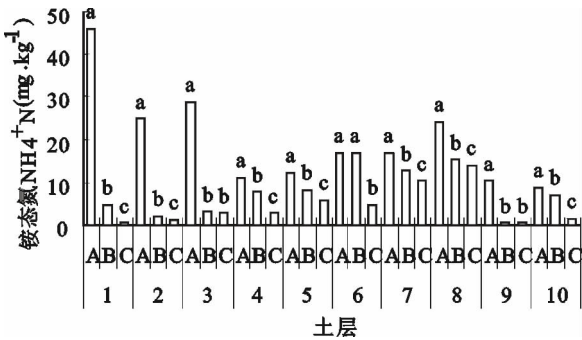


图 3 土壤的铵态氮含量及差异显著性

Fig. 3 NH₄⁺-N content and significant difference of the experimental soils

10 个土壤剖面中,剖面 1、2、3 和 8 的表层土壤铵态氮含量最高,均超过 24. 07 mg · kg⁻¹。而 B、C 两层的土壤铵态氮含量差异性显著的有 8 个剖面,另 2 个剖面的差异不显著。可见,随着土壤深度的增加,铵态氮的含量呈现骤减的趋势,对于有些剖面,下降的趋势更加明显,母质层的铵态氮含量低于 0. 30 mg · kg⁻¹。原因可能在于,随着土壤深度的增加,铵态氮流失和被植物根系吸收利用,导致土壤粘化层和母质层的含量下降。

2.4 供试土壤各层硝态氮含量

硝态氮与铵态氮都是土壤中无机态氮的主要形式。研究表明,对于同一土壤发生层次,铵态氮的含量要比硝态氮的含量高。主要原因是硝态氮在土壤中很少被土壤颗粒所吸持,主要以溶质的形式存在于土壤溶液中^[23];与硝态氮相比,铵态氮更易被土壤吸附,它只有在特定条件如土壤水分接近饱和的情况下借助下渗流的驱动才可能在土壤剖面中随水迁移^[23]。

图 4 表明,供试 10 个土壤剖面的表层硝态氮含量明显高于下层土壤。其中,剖面 1、4、5、6、7、8、9、10 的 A 层和 B、C 层表现出了明显的差异,其余 2 个剖面虽然也表现出了随深度的增加硝态氮含量减少的趋势,但是差异不显著。

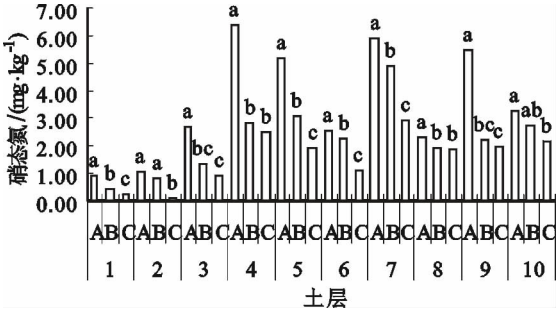


图 4 供试土壤的硝态氮含量及差异显著性

Fig. 4 NO₃⁻-N content and significant difference of the experimental soils

朱红霞等^[24]的研究也表明,表层土壤的硝态氮含量明显要高,而底层的硝态氮含量变化不大,土壤垂直剖面中硝态氮含量基本由土壤上层到下层呈逐渐递减的趋势,这种趋势主要是由硝态氮的性质决定的。

2.5 供试土壤各层 C/N 比

C/N 比是指土壤有机质中的有机碳总量和氮素总量之比,其大小影响微生物对土壤有机质的分解转化。一般来说,微生物通过同化作用形成自身的细胞需要吸收 1 份氮和 5 份碳,同时需要 20 份碳作为生命活动的能源,所以微生物在生命活动过程中,需要土壤的最佳 C/N 比约为 25 : 1,即 C/N 比越接近于 25 : 1,越有利于有机质的转化,C/N 比小于 25 : 1 时,有机质不仅易转化,还可以为土壤提供充足的氮素,但当 C/N 比大于 25 : 1 时,有机质较难转化,而且易出现微生物与植物的争氮现象,但却有利于土壤有机质的积累。

从表 2 中可看出,供试 10 个土壤剖面的 C/N 比基本都在 9.08~23.64 之间,均小于 25:1。一般来说,土壤 C/N 比范围大致处于 2~70 之间,在此分布范围以外的 C/ N 比在其他分析中应作为特异值处理^[25]。本次试验中的 C/N 比均处于这个范围之内,其土壤有机质是容易转化的,转化后一方面可以被植物吸收用于生长,但另一方面,当其分解转化成易溶于水的无机物时,如果没有及时被植物吸收,则会随径流产生流失。

3 结论

秦岭火地塘林区土壤有机碳含量随深度的增加而减少,其中表层的有机碳氮量高于深层,并且差异显著,随着深度的增加,差异显著性减小。随着土层深度的增加,土壤全氮含量随之减少,表层土壤的全氮含量较深层土壤高且差异显著,随着土层深度的增加,土壤全氮含量降低且差异显著性减小。耿玉清等人的研究结果也表明,在森林土壤剖面中全氮呈显著垂直递减规律^[26]。

随着土层深度的增加,土壤铵态氮和胺态氮的含量随之减少,表层土壤的铵态氮含量与深层的相比,含量高且差异显著,B、C 两层的铵态氮含量低且差异不显著。这主要与铵态氮和硝态氮的自身性质有关。

秦岭火地塘林区土壤 C/N 比基本上都小于 25 : 1,有机质易转化且能够为土壤提供充足的氮素。

参考文献:

[1] SEDJO R A. The carbon cycle and global forest ecosystem[J].

Water, Air, and Soil Polution, 1993, 70: 295-307.

[2] COLE D W, RAPP M. Elemental cycling in forest ecosystems [A]// HEICHLE D E. Dynamic properties of forest ecosystems[C]. London: Cambridge University Press, 1981:341-409.

[3] SHAFFER M J, MA L W, HANSEN S. Modeling carbon and nitrogen dynamics for soil management[M]. Boca Raton, FL: Lewis Publishers, 2001:1-10.

[4] PREGITZER K S, EUSKIRCHEN E S. Carbon cycling and storage in world forests: Biome patterns related to forest age [J]. Global Change Biology, 2004, 10: 2052-2077.

[5] FANG C, SMITH P, MONCRIEFF J B, *et al.* Similar response of labile and resistant soil organic matter pools to changes in temperature[J]. Nature, 2005, 433: 57-59.

[6] RAICH J W, TUFEKCIOGLU A. Vegetation and soil respiration: Correlations and controls[J]. Biogeochemistry, 2000, 48: 71-90.

[7] RUSTAD L E, HUNTINGTON T G, BOONE R G. Controls on respiration: Implications for climate change[J]. Biogeochemistry, 2004, 48: 1-6.

[8] 周成虎,周启鸣,王绍强,等. 中国土壤有机碳库空间分布的分析与估算[J]. 人类环境杂志, 2003, 32(1):6-12.

ZHOU C H, ZHOU Q M, WANG S Q, *et al.* Estimating and analyzing the spatial distribution of soil organic carbon in China [J]. Ambio, 2003, 32(1): 6-12.

[9] WANG S H, TIAN H Q, LIU J Y, *et al.* Pattern and change of soil organic carbon storage in China[J]. Tellus B, 2003, 55: 416-427.

[10] 邓小文,韩士杰. 氮沉降对森林生态系统土壤碳库的影响 [J]. 生态学杂志,2007,26(10):1622-1627.

DENG X W, HAN S J. Impact of nitrogen deposition on forest soil carbon pool[J]. Chinese Journal of Ecology, 2007, 26(10): 1622-1627.

[11] 黄昌勇. 土壤学[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000:209-213.

[12] 胡克林,余艳,张凤荣,等. 北京郊区土壤有机质含量的时空变异及其影响因素[J]. 中国农业科学, 2006,39 (4):764-771.

HU K M, YU Y, ZHANG F R, *et al.* The spatial-temporal variability of soil organic matter and its influencing factors in suburban area of Beijing[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2006, 39(4): 764-771.

[13] 荣兴民,陈玉成,王开运,等. 森林土壤碳氮过程研究现状和展望[J]. 内蒙古林业科技,2004(1):30-35.

RONG X M, CHEN Y C, WANG K Y, *et al.* Advances and prospect for carbon and nitrogen process in forest soil[J]. Inner Mongolia Forestry Science & Technology, 2004(1): 30-35.

[14] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3 版. 北京:中国农业出版社, 2000:30-33,44-49.

[15] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京:中国农业科技出版社,2000:147-149.

[16] 中华人民共和国林业行业标准. 森林土壤分析方法[M]. 北京:中国标准出版社,2000:106-108.

[17] 庞凤,李廷轩,王永东,等. 县域农田土壤氮素空间分布特征

及其影响因素[J]. 应用生态学报,2010,21(6):1497-1503.

PANG S, LI T X, WANG Y D, *et al.* Spatial distribution pattern of soil nitrogen in croplands at county scale and related affecting factors[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2010, 21(6): 1497-1503.

[18] 薛晓娟,李英年,杜明远,等. 祁连山东段南麓不同海拔土壤有机质及全氮的分布状况[J]. 冰川冻土,2009,31(4):642-649.

XUE X J, LI Y N, DU M Y, *et al.* Soil organic matter and total nitrogen changing with altitudes on the southern foot of Eastern Qilian Mountains[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2009, 31(4): 642-649.

[19] 党坤良,雷瑞德,耿增超,等. 秦岭火地塘林区不同土壤类型化学性质的研究[J]. 西北林学院学报,1996,11(增):26-30.

DANG K L, LEI R D, GENG Z C, *et al.* Chemical properties of different types of soils at Huoditang forest region in the Qinling Mountains[J]. Journal of Northwest Forestry College, 1996, 11(sup): 26-30.

[20] PAUL K I, POLGLASE P J, NYAKUENGAMA J G, *et al.* Change in soil carbon following afforestation[J]. For. Ecol. Man., 2002, 168: 241-257.

[21] ZINN Y L, DIMAS V S, RESCK J E, *et al.* Soil organic carbon as affected by afforestation with *Eucalyptus* and *Pinus* in the Cerrado region of Brazil[J]. For. Ecol. Man., 2002, 166: 285-294.

[22] 刘西军,黄庆丰,聂昌伟,等. 肖坑不同森林类型土壤氮、磷含量研究[J]. 安徽农业大学学报,2008,35(1):124-127.

LIU X J, HUANG Q F, NIE C W, *et al.* Research on nitrogen and phosphorus content in soil of different forest types in Xiaokeng[J]. Journal of Anhui Agricultural University, 2008, 35(1): 124-127.

[23] 陈效民,邓建才,柯用春,等. 硝态氮垂直运移过程中的影响因素研究[J]. 水土保持学报,2003,17(2):12-15.

CHEN X M, DENG J C, KE Y C, *et al.* Study on influence factors in process of nitrate vertical transport[J]. Journal of Soil and Water, 2003, 17(2): 12-15.

[24] 朱红霞,陈效民,方堃,等. 太湖地区土壤中氮和速效磷的空间变异[J]. 江苏农业学报,2008,24(6):839-842.

ZHU H X, CHEN X M, FANG K, *et al.* Spatial variation of nitrogen and available phosphorus in soil of Taihu lake region[J]. Jiangsu Journal of Agricultural Sciences, 2008, 24(6): 839-842.

[25] BATJES N H. Total carbon and nitrogen in the soils of the world[J]. Europ J Soil Sci,1996,47:151-163.

[26] 耿玉清,余新晓,岳永杰,等. 北京山地森林的土壤养分状况[J]. 林业科学,2010,46(5):169-175.

GENG Y Q, YU X X, YUE Y J, *et al.* Variation of forest soil nutrient content in Mountainous Areas, Beijing[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2010, 46(5): 169-175.