

中国东北样带 (NECT) 土壤碳、氮、磷的梯度分布及其与气候因子的关系

王淑平^{1,2} 周广胜^{1*} 吕育财² 邹建军²

(1 中国科学院植物研究所植被数量生态学重点实验室, 北京 100093)

(2 吉林农业大学, 长春 130118)

摘要 以中国东北样带 (NECT) 为依托, 基于沿样带的野外观测和土壤实测数据, 分析了沿样带的土壤碳、氮、磷的空间分布格局及其与年降水、年均温之间的关系。结果表明: 样带内土壤有机碳、土壤全氮、土壤有效氮、土壤全磷、土壤有效磷沿经度均呈现出东高西低的分布趋势; 降水量和温度对土壤碳、氮、磷的作用强度顺序分别为土壤有效氮、土壤有机碳、土壤全氮、土壤全磷和土壤有效磷; 并建立了土壤有机碳、土壤全氮、土壤有效氮、土壤全磷、土壤有效磷与年降水、年均温之间的多项式回归方程, 为样带陆地碳收支评估及养分循环提供基础资料。

关键词 中国东北样带 土壤碳 土壤氮 土壤磷 回归分析

DISTRIBUTION OF SOIL CARBON, NITROGEN AND PHOSPHORUS ALONG NORTHEAST CHINA TRANSECT (NECT) AND THEIR RELATIONSHIPS WITH CLIMATIC FACTORS

WANG Shu-Ping^{1,2} ZHOU Guang-Sheng^{1*} LU Yu-Cai² and ZOU Jian-Jun²

(1 Laboratory of Quantitative Vegetation Ecology, Institute of Botany, the Chinese Academy of Science, Beijing 100093, China)

(2 Jilin Agricultural University, Changchun 130118, China)

Abstract The carbon cycle is central to the global ecosystem, being inextricably coupled with climate, the water cycle, nutrient cycles, and the production of biomass by photosynthesis on land and in the oceans. It is very helpful for understanding the environmental history of our planet and its inhabitants, and for predicting and steering their joint future. The soil is an important component of the terrestrial ecosystems and plays a significant role in the global carbon cycle. Understanding the distribution characteristics of soil carbon storage and their relationships with environmental factors is key to estimating terrestrial carbon cycle at regional and global scales. Moreover, the amount of soil nutrients directly affects the structure and function of terrestrial systems, and their carbon cycling through effects on their primary production (*NPP*). Thus, it is necessary to know the distinctive distribution of soil carbon, nitrogen, and phosphorus, and their responses to climatic factors.

Terrestrial transect has become an important and effective method for the study of global change, especially for Global Change and Terrestrial Transect (GCTE), the core project of the International Geosphere-Biosphere Programme (IGBP). Northeast China Transect (NECT) is one of the fifteen global transects recognized by IGBP, which is assigned along the latitude 43°30' N in the mid-latitude of the temperate zone, located between longitude 112° ~ 130°30' E, latitude 42° ~ 46° N. It is about 1 600 km in length and 300 km in width. NECT is mainly driven by precipitation, and has become an effective platform of global change study in China.

In this paper, the gradient distribution of soil carbon, nitrogen and phosphorus along Northeast China Transect (NECT) and their responses to climatic factors were analyzed by regression using data from the survey along NECT. The results indicate that the contents of soil organic carbon, soil total nitrogen, soil available nitrogen, soil total phosphorus and soil available phosphorus decrease from east to west along the NECT. The effects of precipitation and temperature on soil carbon, nitrogen and phosphorus decrease from soil available nitrogen, through soil organic carbon, soil total nitrogen, to soil total phosphorus and soil available phosphorus by correlation analysis and standardized regression analysis. The regression equations of soil organic carbon (*SOC*), soil total nitrogen (*STN*), soil available nitrogen (*SAV*), soil total phosphorus (*STP*) and soil available phosphorus (*SAP*) with precipitation and temperature were also developed. They are as follows:

$$SOC = -671.164 + 0.08505p + 14.255t - 0.0406pt - 1.479t^2 + 5.793l$$

收稿日期: 2002-01-28 接受日期: 2002-04-29

基金项目: 国家重点基础研究发展规划项目 (G1999043407)、中国科学院知识创新工程项目 (KZCX1-SW-01-12, KSCX2-1-07) 和自然科学基金项目 (30070642, 30028001)

* 通讯作者 Author for correspondence E-mail: zhongs@public2.bta.net.cn

$$STN = -41.667 + 0.004074p + 0.631t - 0.00180pt - 0.0937t^2 + 0.367l$$

$$SAN = -3601.102 + 0.436p + 105.250t - 0.207pt - 11.347t^2 + 30.608l$$

$$STP = -6.848 + 0.002137p + 0.120t - 0.000599pt - 0.00776t^2 + 0.05944l$$

$$SAP = -141.032 + 0.08006p + 1.950t - 0.0221pt + 0.446t^2 + 1.136l$$

This study provides the evaluation of the carbon budget and nutrient biogeochemical cycles of terrestrial ecosystems along NECT with basic data.

Key words Northeast China Transect (NECT), Soil carbon, Soil nitrogen, Soil phosphorus, Regression analysis

准确地评估陆地生态系统碳循环不仅是准确地估算未来大气 CO₂ 浓度、预测气候变化及其对陆地生态系统影响的关键,也是履行《联合国气候变化框架公约(UNFCCC)》和《京都议定书》及制定应对策略的关键,已经成为国际全球变化的研究热点。

全球碳循环发生于大气、海洋和陆地之间。土壤作为陆地生态系统的重要组成部分,是陆地生态系统中物质与能量交换的重要场所,其在全球碳循环中起着十分重要的作用。一方面,土壤作为生态系统中生物与环境相互作用的产物,贮存着大量的碳;另一方面,土壤养分对于植物的生长起着关键性的作用,直接影响植物群落的组成与生理活力,决定着生态系统的结构、功能和生产力水平(Rboertson & Vitousek, 1981; Vitousek *et al.*, 1989),进而影响陆地碳循环。据估计,全球平均而言,森林土壤的碳贮量占森林生态系统碳贮量的 39%(Dixon *et al.*, 1994);草地土壤的碳贮量占草地碳贮量的 89.4%(Atjay *et al.*, 1979)。单位面积的温带草原碳贮量较热带草原大,一般为热带草原的 2~4 倍(Houghton & Hackler, 1995)。因此,弄清陆地土壤碳贮量的空间分布特征及其与环境的关系是评估陆地碳循环的关键之一。

全球变化的陆地样带为理解陆地生态系统的碳循环过程、控制因子及其准确评估陆地生态系统碳收支提供了有效的研究平台(Koch *et al.*, 1995)。目前,国际地圈-生物圈计划(IGBP)基于不同地区全球变化驱动因素的不同以及全球变化的潜在反馈作用强度的不同,在全球 4 个关键地区共启动了 15 条 IGBP 陆地样带。以水分为主要驱动力的中国东北样带(NECT: Northeast China Transect)即为 IGBP 的陆地样带之一(张新时等, 1997; Koch *et al.*, 1995; Raich *et al.*, 1997)。

本文将中国东北样带(NECT)为依托,根据沿该样带的土壤实测数据分析土壤碳、氮、磷的空间分布特点及其与气候因素(降水和温度)之间的关系,为进一步研究全球气候变化下的碳、氮、磷的生物地

球化学循环及评估陆地生态系统的碳收支提供基础资料。

1 材料和方法

1.1 土壤样品的采集

土壤样品来自于 1997 年 7~8 月沿中国东北样带(Northeast China Transect, NECT)的野外考察。该样带位于中纬度温带, 112°~130°30' E, 42°~46° N 之间,沿 43.5° N 设置,长约 1 600 km,宽约 300 km。本次样带考察是由中国科学院植物研究所植被数量生态学开放研究实验室组织,联合北京师范大学、东北师范大学、中国科学院沈阳应用生态研究所、美国 Colorado 大学等机构进行。考察组 7 月 18 日从中国吉林珲春出发,沿 43.5° N 向西,每隔 25 km 用全球定位系统(Global Positioning System, GPS)确定采样地点,进行植物群落、土地利用、优势植物光合作用测定;同时,选取代表性地段,挖土壤剖面,按土壤发生层次取表层混合样品,装入布袋,风干后进行室内化学分析。

1.2 土壤样品的化学分析方法

土壤有机碳的测定采用外加热、重铬酸钾容量法。土壤全氮的测定采用半微量开氏法。土壤全磷的测定采用硫酸-高氯酸消煮、钼锑抗比色法。土壤有效氮的测定采用碱解扩散法。土壤有效磷的测定采用 Olsen 法。具体见文献(李酉开, 1983)。

1.3 气象资料的收集与分析

野外考察完成后,收集样带内 110 个气象站的平均温度与年降水量等气象资料;并借助 SPSS 统计分析软件分析土壤有机碳、土壤全氮、土壤全磷、土壤有效氮、土壤有效磷与年降水、年均温之间的关系。

2 结果与分析

2.1 中国东北样带土壤有机碳的梯度分布及其与气候因子的关系

土壤有机碳主要来源于动物、植物、微生物残体

及其分泌物,处于不断的分解与形成的动态平衡过程中。土壤有机碳含量是特定生态系统下的动态平衡值。因此,在不同的生物气候条件下,土壤有机碳的数量有很大差异(图 1)。从图 1 可以看出,样带内土壤有机碳呈现东高西低的趋势,这一分布趋势与样带植被的分布相一致。

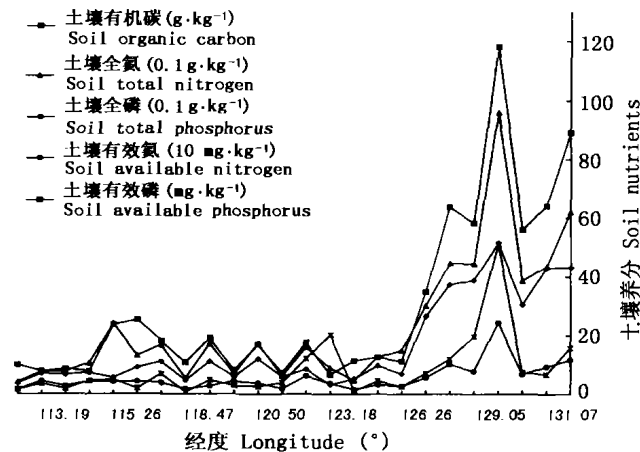


图 1 中国东北样带土壤养分的梯度分布

Fig. 1 Gradient distribution of soil nutrients along NECT

样带东部(126°~131° E)为温带针阔混交林山地,具有海洋型温带季风气候的特征,降水丰富,年平均气温较低,植被种类极其丰富,地带性土壤为暗棕壤,并且多为自然土壤,土壤有机碳含量高。但由于采样区局部地理环境、植被结构(如植被种类、生物量、丰富度等)、土地利用方式及人类干扰程度的不同,土壤有机碳含量变异较大,平均为 $69.1 \pm 10.2 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。样带中部(119°~126° E)为松辽平原柞林草原、农田区和大兴安岭山地草甸草原区,属半湿润向半干旱过渡的气候。该区域主要土壤类型为黑土、黑钙土、盐化或碱化草甸土及风沙土,土壤有机碳含量为 $11.8 \pm 1.6 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。样带中西部(113°~119° E)为内蒙古高原草甸草原和典型草原区域,具有典型的半干旱气候特征。该区地带性土壤为栗钙土,局部丘陵区分布黑钙土,土壤有机碳含量为 $16.1 \pm 1.0 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。西部(112°~113° E)为内蒙古高原荒漠草原区域,地带性土壤为棕钙土,土壤有机碳含量 $8.5 \pm 0.6 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

土壤有机碳是土壤中有有机物质矿化与腐殖化综合作用的结果。土壤有机碳含量取决于进入土壤的有机物质数量及其腐殖化系数的大小。气候因子通过影响植被而影响进入土壤的有机物质的数量,同时又强烈地影响着土壤有机质的分解与形成。研究发现, ^{14}C 标记的黑麦草在热带气候条件下的分解速

率几乎比在温带快了 4 倍(Jenkinson & Ayanaba, 1977),同一物质的玉米秸秆在中国东北地区的腐殖化系数为 0.26~0.48,而在江南地区则是 0.19~0.22(沈善敏,1998)。在腐解的环境条件相同时,植物残体的腐殖化系数与其木质素含量呈显著或极显著正相关,而降雨量会影响植物生物量中木质素含量(Singh & Gupta, 1977)。因此,气候因子直接或间接地影响着土壤有机碳的含量。

对中国东北样带土壤有机碳与年降水、年均温之间的关系分析表明,土壤有机碳含量和降水量之间呈显著正相关,相关系数 $R = 0.760^{**}$ 。温度对土壤有机碳的影响很复杂,土壤有机碳含量和年均温相对海拔高度的偏相关系数达显著水平 $R = -0.4685^*$,呈显著负相关。对样带土壤有机碳含量与降水量、年均温之间的相关分析表明,土壤有机碳含量(SOC)与降水量(p)、年均温(t)之间呈显著相关,其标准化回归方程为:

$$\text{SOC} = 0.629p + 0.256t + 0.204pt - 0.704t^2$$

$$R = 0.832$$

这说明样带内土壤有机碳含量除与降水量、温度有关外,还受其它因子的影响。降水对土壤有机碳的影响大于温度的影响。温度对土壤有机碳的影响较为复杂,适宜的温度有利于土壤有机碳的积累;否则对土壤有机碳的积累具有负效应。降水量和温度对土壤有机碳的积累具有正交互作用,表明土壤有机碳是降水量、温度及其它影响因子综合作用的结果。

2.2 中国东北样带土壤全氮、有效氮的梯度分布及其与气候因子的关系

氮是大气圈中含量最丰富的元素,但也是陆地生态系统植物生产力的限制元素之一。在自然生态系统中,土壤氮主要来自于生物固氮和随降水进入土壤中的氮,土壤潮湿和高温有利于氮的固定。在漫长的成土过程作用下,土壤氮形成了特定生态条件下的平衡。样带内土壤全氮的梯度分布与土壤有机碳的分布基本一致(图 1):沿经度呈现东高西低的趋势。

样带东部(经度 126°~131°)土壤全氮含量高且变异大,平均为 $5.125 \pm 0.828 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。样带中部(经度 119°~126°)区域土壤全氮含量平均为 $1.146 \pm 0.190 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。样带中西部(经度 113°~119°)区域土壤全氮含量平均为 $1.340 \pm 0.246 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。而样带西部(经度 112°~113°)区域土壤全氮含量平均为 $0.650 \pm 0.115 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

土壤中的氮 90% 以上是有机氮, 土壤全氮含量与土壤有机碳含量呈极显著正相关, 相关系数 $R = 0.984^{**}$ 。土壤全氮含量 (STN) 与降水量 (p)、年均温 (t) 之间的标准化回归方程为:

$$STN = 0.455p + 0.031t + 0.437pt - 0.600t^2$$

$$R = 0.801$$

土壤有效氮是指植物能够吸收利用的氮, 主要包括土壤中矿质态氮和较简单的有机态氮, 主要来自土壤有机氮的矿化。分析表明, 土壤有效氮含量与土壤全氮含量呈极显著正相关, 相关系数 $R = 0.958^{**}$ 。但是, 土壤有机氮的矿化受很多因素, 包括土壤有机物质的组成 (特别是 C/N)、降水、温度及季节性等的影响。研究表明, 土壤氮的矿化速率和硝化速率与温度和湿度呈正相关 (周才平等, 2001)。

从图 1 可以看出, 土壤有效氮含量在样带内的分布与土壤全氮分布的大趋势基本相似, 但存在局部的不同。样带东部 ($126^\circ \sim 131^\circ E$) 区域土壤有效氮含量很高且变异大, 平均为 $386 \pm 31.6 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。样带中部 ($119^\circ \sim 126^\circ E$) 区域土壤有效氮含量平均为 $73 \pm 11.2 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。样带中西部 ($113^\circ \sim 119^\circ E$) 区域土壤有效氮含量平均为 $78 \pm 9.9 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。样带西部 ($112^\circ \sim 113^\circ E$) 区域土壤全氮含量平均为 $58 \pm 10.1 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。土壤有效氮含量和降水量之间呈显著正相关, 相关系数 $R = 0.828^{**}$ 。土壤有效氮含量和年均温之间简单相关系数不显著, 但其相对海拔高度的偏相关系数达显著水平 $R = -0.4672^*$, 呈显著负相关。土壤有效氮含量 (SAN) 与降水量 (p)、年均温 (t) 之间的标准化回归方程为:

$$SAN = 0.634p + 0.561t + 0.248pt - 1.002t^2$$

$$R = 0.893$$

这说明降雨量与温度是影响土壤有效氮含量的主要限制因子, 而降水量和温度对土壤有效氮具有正交互作用。

2.3 中国东北样带土壤全磷、有效磷的梯度分布及其与气候因子的关系

自然土壤中通常含有 $0.8 \sim 5.0 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 的磷, 其中大多数来自母岩矿物。在漫长的土壤形成过程中, 植被吸收土壤中的无机磷形成有机磷, 并通过其残体归还于土壤。因此, 自然土壤中有机磷含量常高于无机磷含量。

从图 1 可以看出, 样带土壤全磷含量仍然呈现出东高西低的趋势。但由于土壤磷的含量受母质及人为活动干扰的影响很大, 表现出与土壤有机碳的分布趋势既相似又存在局部差异的特点。样带东部

($126^\circ \sim 131^\circ E$) 土壤全磷含量很高且变异大, 平均 $0.547 \pm 0.24 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。样带中部 ($119^\circ \sim 126^\circ E$) 区域土壤全磷含量平均为 $0.319 \pm 0.058 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。样带中西部 ($113^\circ \sim 119^\circ E$) 区域土壤全磷含量平均为 $0.362 \pm 0.039 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。样带西部 ($112^\circ \sim 113^\circ E$) 区域土壤全磷含量平均为 $0.292 \pm 0.081 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

土壤有效磷是指植物能够吸收利用的磷, 来自土壤有机磷的矿化与无机磷的释放。土壤有效磷与土壤全磷呈极显著正相关, 相关系数 $R = 0.892^{**}$ 。影响土壤磷有效化的因素很多, 也很复杂。从图 1 可以看出, 样带内土壤有效磷的分布与全磷的分布相比呈现出局部的差异, 但仍呈现出东高西低的趋势。样带东部 ($126^\circ \sim 131^\circ E$) 区域土壤有效磷含量很高, 平均为 $17.0 \pm 6.0 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。样带中部 ($119^\circ \sim 126^\circ E$) 区域土壤有效磷含量平均为 $6.7 \pm 2.6 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。样带中西部 ($113^\circ \sim 119^\circ E$) 区域土壤有效磷含量平均为 $3.7 \pm 0.8 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。样带西部 ($112^\circ \sim 113^\circ E$) 区域土壤有效磷含量平均为 $2.3 \pm 0.6 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

土壤全磷含量 (STP) 和土壤有效磷含量 (SAP) 与降水量 (p)、年均温 (t) 之间的标准化回归方程分别为:

$$STP = 0.756p + 0.078t - 0.156pt - 0.258t^2$$

$$R = 0.676$$

$$SAP = 1.162p + 0.019t - 0.896pt + 0.744t^2$$

$$R = 0.528$$

从方程可以看出, 降雨量和温度对土壤磷的影响强度低于土壤碳、氮, 这是因为土壤磷分布受诸如土壤母质等因子的影响较大。

2.4 中国东北样带土壤碳、氮、磷的经度分布

为了进一步说明中国东北样带土壤碳、氮、磷的分布趋势, 利用 SPSS 统计软件分析了土壤碳、氮、磷与降水量 (p)、年均温 (t)、经度 (l) 之间的回归关系, 得到其多项式回归方程为:

$$SOC = -671.164 + 0.08505p + 14.255t - 0.0406pt - 1.479t^2 + 5.793l \quad R = 0.885$$

$$STN = -41.667 + 0.004074p + 0.631t - 0.00180pt - 0.0937t^2 + 0.367l \quad R = 0.841$$

$$SAN = -3601.102 + 0.436p + 105.250t - 0.207pt - 11.347t^2 + 30.608l \quad R = 0.945$$

$$STP = -6.848 + 0.002137p + 0.120t - 0.000599pt - 0.00776t^2 + 0.05944l \quad R = 0.702$$

$$SAP = -141.032 + 0.08006p + 1.950t - 0.0221pt + 0.446t^2 + 1.136l \quad R = 0.553$$

可见,降雨量和温度对土壤碳、氮、磷影响强度的顺序依次为土壤有效氮、土壤有机碳、土壤全氮、土壤全磷和土壤有效磷。

3 结 论

通过分析中国东北样带土壤碳、氮、磷的分布特点及其与降雨量和年均温之间的关系,可以看出,样带内土壤有机碳、土壤全氮、土壤有效氮、土壤全磷、土壤有效磷沿经度均呈现出东高西低的分布趋势,除土壤有效磷外,土壤有机碳、土壤全氮、土壤有效氮、土壤全磷含量均表现为:样带东部(126° ~ 131° E)区域 > 中西部(113° ~ 119° E)区域 > 中部(119° ~ 126° E)区域 > 西部(112° ~ 113° E)区域。

土壤碳、氮、磷含量不仅与降水量和温度有关,而且与土壤特性、土地利用方式、植被特性及人类的干扰程度有关。降水量和温度对土壤碳、氮、磷作用强度的顺序依次为土壤有效氮、土壤有机碳、土壤全氮、土壤全磷和土壤有效磷。

参 考 文 献

- Atjay, G. L., P. Ketner & P. Duvigeaud. 1979. Terrestrial primary production and phytomass. In: Bolin, B., E. T. Degens & S. Kempe eds. *The global carbon cycle SCOPE 13*. Chichester: John Wiley & Sons. 129 ~ 182.
- Dixon, R. K., S. Brown, R. A. Houghton, A. M. Solomon, M. C. Trexler & J. Wisniewski. 1994. Carbon pools and flux of global forest ecosystems. *Science*, **263**: 185 ~ 190.
- Houghton, R. A. & J. L. Hackler. 1995. Continental scale estimates of the biotic carbon flux from land cover change: 1850 ~ 1980. ORNL/CDIAC-79, NDP-050, Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, Tennessee, USA, 144.
- Jenkinson, D. S. & A. Ayanaba. 1977. Decomposition of ¹⁴C labeled plant material under tropical condition. *Soil Science Society America of Journal*, **41**: 912 ~ 915.
- Koch, G. W., R. J. Scholes, W. L. Steffen, P. M. Vitousek & B. H. Walker. 1995. *The IGBP Terrestrial Transects: IGBP Reports No. 36*. Stockholm: IGBP.
- Li, Y. K. (李酉开). 1983. *The general analysis method of soil agricultural chemistry*. Beijing: Science Press. (in Chinese)
- Raich, J. W., A. E. Russell & P. M. Vitousek. 1997. Primary productivity and ecosystem development along an elevational gradient on Mauna Loa, Hawai'i. *Ecology*, **78**: 707 ~ 721.
- Robertson, G. P. & P. M. Vitousek. 1981. Nitrification potentials in primary and secondary succession. *Ecology*, **62**: 376 ~ 386.
- Shen, S. M. (沈善敏). 1998. *Chinese soil fertility*. Beijing: China Agriculture Press. (in Chinese)
- Singh, J. S. & S. R. Gupta. 1977. Plant decomposition and soil respiration in terrestrial ecosystems. *The Botanical Review*, **43**: 449 ~ 528.
- Vitousek, P. M., P. A. Matson & K. Van Cleve. 1989. Nitrogen availability and nitrification during succession, primary, secondary and old field seres. *Plant and Soil*, **115**: 229 ~ 239.
- Zhang, X. S. (张新时), Q. Gao (高琼), D. A. Yang (杨莫安), G. S. Zhou (周广胜), J. Ni (倪健) & Q. Wang (王权). 1997. A Gradient analysis and prediction on the Northeast China Transect for global change study. *Acta Botanica Sinica (植物学报)*, **39**: 785 ~ 799. (in Chinese)
- Zhou, C. P. (周才平) & H. Ouyang (欧阳华). 2001. Temperature and moisture effects on soil nitrogen mineralization in deciduous broad-leaved forest. *Acta Phytocologica Sinica (植物生态学报)*, **25**: 204 ~ 209. (in Chinese)

责任编辑: 欧阳 华 责任编辑: 张丽赫