

农田土壤碳氮及其与气象因子的关系

吕国红^{1,2,3}, 王笑影¹, 张玉书¹, 贾庆宇¹, 谢艳兵¹

(1.中国气象局沈阳大气环境研究所, 沈阳 110016; 2.中国科学院沈阳应用生态研究所, 沈阳 110016; 3.中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘要:为揭示土壤碳氮受外界环境因子的影响,基于辽宁省 51 个农业气象站的代表性,分析了土壤有机碳和全氮的剖面分布及其与气象因子、地理因子的关系。结果表明,土壤表层(0~20 cm)有机碳和全氮含量总体高于土壤下层(20~40 cm);不同土层土壤有机碳和全氮受年降水量、年平均气温的影响程度不同。土壤表层有机碳和全氮受年降水量、年平均气温的显著或极显著影响($P<0.05$, $P<0.01$);土壤下层有机碳和全氮均与年平均气温呈显著负相关($P<0.01$),而与年降水量不成显著相关。经度与土壤表层有机碳和土壤下层全氮呈显著正相关($P<0.05$),而纬度和海拔不影响土壤有机碳和全氮。不同土层有机碳、全氮与气象因子的回归方程为农田生态系统的碳收支评估及养分循环提供基础资料。

关键词:土壤有机碳;土壤全氮;年平均气温;年降水量;剖面分布

中图分类号:S153.6 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-2043(2010)08-1612-06

Soil Carbon, Nitrogen of the Farmland and Their Relationships with Climatic Factors

LV Guo-hong^{1,2,3}, WANG Xiao-ying¹, ZHANG Yu-shu¹, JIA Qing-yu¹, XIE Yan-bing¹

(1.Institute of Atmospheric Environment, Chinese Meteorological Administration, Shenyang 110016, China; 2. Institute of Applied Ecology, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China; 3. Graduated School of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: The cycles of soil carbon and nitrogen are the basic ecological processes in the farmland ecosystem. In addition to the influence of farm management strategy, the contents of soil carbon and nitrogen are also affected by the external environment factors. In this paper, the profile distribution of soil carbon, and nitrogen and their responses to the climatic and geographical factors were analyzed using data from 51 agriculture weather stations in the Liaoning Province. The results showed that the contents of soil organic carbon and total nitrogen were higher in the soil surface (0~20 cm) than those in the lower (20~40 cm). It was different for effects of precipitation and temperature on soil organic carbon and total nitrogen in different soil layers. Soil organic carbon and total nitrogen were significantly influenced by annual total precipitation and annual mean temperature in the soil surface ($P<0.05$, $P<0.01$); and were markedly negatively correlated with annual mean temperature ($P<0.01$), but not with precipitation in the lower soil layer. Longitude exhibited a positive correlation with soil organic carbon in the soil surface and soil total nitrogen in the lower soil layer ($P<0.05$), while latitude and elevation not with soil organic carbon and total nitrogen. The regression equations of soil organic carbon and soil total nitrogen with precipitation and temperature were also established, which provides the basic data to evaluate the carbon budget and nutrient and biogeochemical cycles of farmland ecosystem.

Keywords: soil organic carbon; soil total nitrogen; annual mean temperature; annual total precipitation; profile distributions

土壤碳氮是农田土壤质量和肥力的重要指标,直接关系到农田的可持续利用,在一定程度上决定着粮食安全,同时也是固碳减排的重要决策依据。土壤有

机碳不仅影响土壤肥力,而且通过多种途径影响土壤向大气释放或固持大气中的 CO_2 ,从而影响土壤与大气之间的碳素平衡^[1]。土壤全氮是标志土壤氮素总量和供应植物有效氮素的源和库,综合反映了土壤的氮素状况^[2]。因此,揭示农田土壤碳氮含量是土壤质量评价、生态环境评价的重要组成部分。

由于全球环境变化的广泛性及其不同的趋势,全面理解土壤碳氮对于迅速变化的环境的反应日益成为研究的重点。王淑平等^[3]依托以水分为主要驱动力

收稿日期:2010-03-02

基金项目:国家自然科学基金项目(40605007);科技部公益性项目(SYKYYW200903)

作者简介:吕国红(1977—),女,山东莱芜人,博士研究生,助研,主要从事碳循环方面的研究。E-mail:ghlvme@163.com

通讯作者:王笑影 E-mail:wangxy_0917@yahoo.com.cn

的中国东北样带(Northeast China Transect, NECT),建立了土壤有机碳、土壤全氮与年降水量、年平均温度之间的多项式回归方程;国秀丽^[4]通过室内模拟试验,系统研究了水热条件及施肥处理对土壤不同形态碳、氮的影响;曹宏杰等^[5]研究发现土壤有机碳、全氮与气候因素之间存在着良好的相关性。温度和降水的综合作用决定了陆地土壤碳密度分布的地理地带性^[6-8]。目前气象条件对土壤碳氮的影响分析,多集中于土壤表层,而土壤表层特别是0~20 cm部分反映了植物根系可吸收利用的碳氮状况,缺乏研究不同土壤深度土壤碳氮含量对气象条件的响应。

辽宁省地处我国温带、暖温带气候带,农业历史比较悠久。由辽宁省气象局建立的农业气象站具有地理位置、气候特点和耕作制度等方面的代表性,因此本研究基于辽宁省51个农业气象站,分析土壤有机碳和全氮的剖面分布及不同土壤深度土壤碳氮与气象因子、地理因子的关系,将有助于深入研究气候变化条件下土壤养分的利用状况,对促进农业生产的持续高效发展及陆地生态系统的良性循环具有重要的生态意义和实际意义。

1 材料与方法

1.1 研究区域

辽宁省位于我国东北平原南部,地理坐标为东经118°50′~125°47′,北纬38°43′~43°29′。辽宁省地处欧亚大陆东岸,属温带大陆性季风气候。年平均气温在4.8~10.4℃之间,年降雨量主要集中在汛期,6—9月降雨日为90 d左右,占汛期的85%,平均降水在500 mm左右,占年降水量的77.2%。耕地面积总计为4 174 785.46 hm²,占全省总土地面积的28.2%。农作物以水稻、玉米、大豆为主,占种植面积的82.9%,蔬菜和其他作物占7.6%。农田土壤类型主要有棕壤、褐土、草甸土、潮土、滨海盐土和水稻土等^[9]。

1.2 土壤样品的采集与分析

土壤采集在秋收后、土壤封冻前,在全省51个农业气象站(图1)选择典型农业生态类型,于0~20 cm和20~40 cm的土壤深度分别进行混合取样,并进行相应的GPS定位。所有土壤样品自然风干,研磨后过100目筛,采用元素分析仪Elementar III测定土壤有机碳、氮含量。各农业气象站工作人员负责野外采样,记录,统一送样。中科院沈阳应用生态研究所土壤生态与农业生态工程研究中心负责完成土壤有机碳及全氮的测试。



图1 辽宁省农业气象站分布图

Figure 1 Distribution of agricultural weather stations in Liaoning province

1.3 气象资料的收集与分析

收集相应农业气象站2007年的年平均气温与年降水量资料。气象资料来自于辽宁省气象局区域气候中心资料室。

SPSS13.0软件分析土壤有机碳、土壤全氮与年降水量、年平均气温、经度、纬度和海拔之间的关系。为消除量纲的影响,采用标准化法对数据进行了无量纲处理,然后采用Pearson相关分析方法,得到土壤有机碳、全氮与气象因子的相关矩阵。利用EXCEL软件作图。

2 结果与分析

2.1 土壤碳氮的剖面分布

土壤有机碳和全氮总体呈现随土壤深度的增加而降低(图2),这反映了土壤养分向表层的富集。5个农业气象站土壤表层(0~20 cm)有机碳含量低于下层(20~40 cm),降幅范围为0.03~2.11 g·kg⁻¹。西丰站土壤下层全氮含量比表层高,高0.17 g·kg⁻¹,其他农业气象站土壤全氮均呈现随土壤深度的增加而降低,平均下降0.31 g·kg⁻¹。

土壤有机碳和全氮存在明显的空间差异性,按照变异系数(CV)划分等级有:弱变性(CV≤10%),中等变性(10%<CV<100%),强变性(CV≥100%)。不同土壤深度有机碳和全氮的空间变异均属于中等变性。土壤有机碳的空间变性高于土壤全氮,在

表层和下层的变异系数分别为 57.59%和 54.51%,全氮分别为 27.14%和 31.19%。土壤有机碳和全氮在采样点间的整体变化趋势,无一定的规律性,但上、下层含量的总体变化趋势趋于一致性,即表层含量高,则下层含量也相对较高。

2.2 土壤碳氮与气象因子的相关性

不同土壤深度有机碳和全氮受年降水量和年平均气温的影响程度不同(表 1)。土壤表层有机碳与年降水量呈极显著正相关,相关系数为 0.53($P<0.01$),而与年平均气温呈显著负相关($P<0.05$)。土壤下层有机碳与年降水量无关,而与年平均气温呈极显著负相

关($P<0.01$),其相关系数高于土壤表层。土壤全氮与有机碳呈现一致性,即与年降水量呈正相关,与年平均气温呈负相关。年平均气温对土壤上、下层全氮有显著或极显著影响,而年降水量与土壤下层全氮呈极显著负相关,与土壤表层全氮无关。土壤有机碳和全氮呈极显著正相关,相关系数为 0.79,进一步说明土壤碳氮是土壤有机质的主要组成部分。

经度、纬度和海拔反映了研究地点的水热状况,因此本研究分析了经度、纬度和海拔对有机碳和全氮的影响(表 1)。经度对土壤表层有机碳和土壤下层全氮有显著影响,相关系数分别为 0.31 和 0.32($P<0.05$),

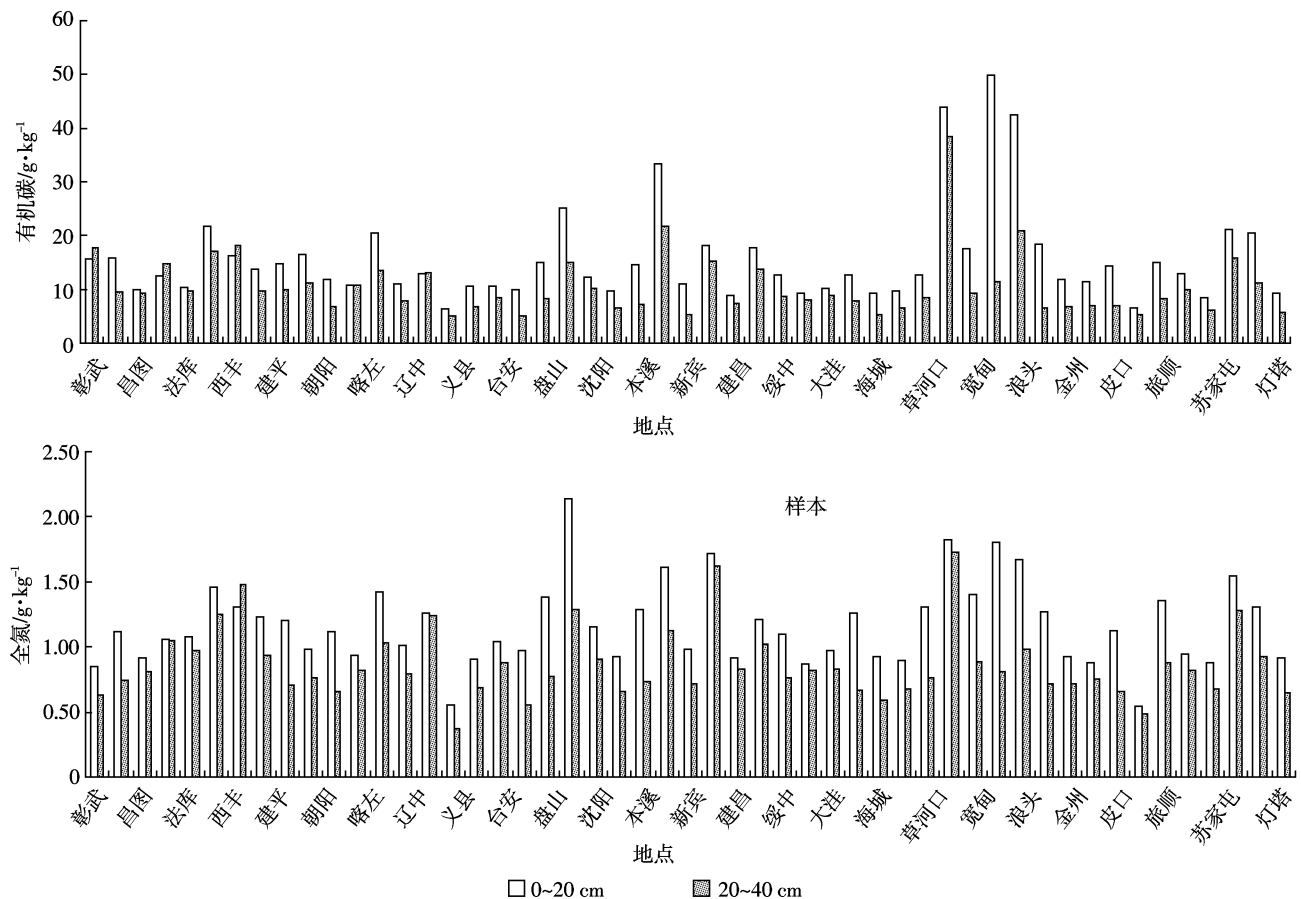


图 2 土壤有机碳与全氮剖面分布

Figure 2 Profile distributions of soil organic carbon and total nitrogen

表 1 土壤碳氮与气象因子和地理因子的相关性

Table 1 Correlation of soil carbon and nitrogen with climatic and geographical factors

土层/cm	土壤碳氮	有机碳	全氮	年降水量	年平均气温	经度	纬度	海拔
0~20	有机碳	1.00	0.79**	0.53**	-0.31*	0.31*	-0.06	0.19
	全氮		1.00	0.32*	-0.31*	0.27	0.02	0.16
20~40	有机碳	1.00	0.79**	0.20	-0.43**	0.23	0.19	0.23
	全氮		1.00	0.15	-0.48**	0.32*	0.22	0.20

注:**,呈极显著相关($P<0.01$);*,呈显著相关($P<0.05$)。

纬度和海拔对土壤有机碳和全氮影响很小或无关。将不同土层中的有机碳和全氮分别与年降水量、年平均气温、经度、纬度和海拔作线性逐步回归,其回归方程分别如下:

$$SOC_1=0.02p-1.81t+19.916 \quad (R=0.59, P=0.000)$$

$$STN_1=0.4 \times 10^{-3}p-0.068t+1.557 \quad (R=0.43, P=0.012)$$

$$SOC_2=-1.837t+28.356 \quad (R=0.43, P=0.003)$$

$$STN_2=-0.096t+1.785 \quad (R=0.48, P=0.001)$$

式中: SOC_1 、 SOC_2 分别为土壤上层和下层的有机碳; STN_1 和 STN_2 分别为土壤上层和下层全氮; p 为年降水量; t 为年平均气温。

不同土层有机碳和全氮的回归方程均达到了显著或极显著水平,其中土壤表层有机碳和全氮受年降水量和年平均气温的综合影响,而土壤下层受年平均气温的显著影响。

3 讨论

3.1 土壤碳氮的剖面分布

土壤有机碳和全氮的垂直分布特征反映了农田土壤的理化性质、土壤生境、农作物残体的输入、土壤微生物的活性、农田管理措施等诸多方面的综合影响。土壤有机碳和全氮主要集中在0~20 cm,说明土壤表层有机质含量丰富,光热条件有利于微生物活动和生化反应,从而有利于土壤有机碳和全氮的形成和积累。

土壤有机碳随土壤深度的增加而降低(图2),这可能与农田管理措施有关。大量的研究也发现,土壤有机碳的剖面分布特征与不同的土地利用方式和管理工作有关,均为上层含量较高^[10-12]。土壤有机碳主要来源于地表凋落物、微生物生物量的输入,输出过程则是在微生物的作用下以 CO_2 的形式向大气中释放。在农田生态系统中施肥、灌溉、耕作等管理措施是影响土壤有机碳垂直分布特征的主要因素,并且这些管理措施主要发生在土壤表层。农田秸秆焚烧量减少,枯落物还田量增加有助于土壤表层有机碳的增加,另外长期施肥也能够增加土壤中有机碳含量^[2]。施用无机肥或有机肥可增加作物产量,从而提高农作物的残茬量,进而弥补土壤有机质的矿化损失,同时大量有机物料的投入也增加了土壤碳源。土壤表层作物残茬量和有机物料的输入量大,其表层有机碳含量也相对较高。

土壤中95%的氮以有机态的形式存在,主要来源于枯枝落叶和动物尸体,也有少量来源于大气氮沉降

和生物固氮,土壤氮的输出主要是土壤中的有机质分解后大部分被植物吸收利用,部分氮经过硝化、反硝化或挥发以气态释放到大气中^[13]。土壤全氮与土壤有机碳一样,均呈表层富集的现象,这与大多数的研究结果一致^[10,14-15],说明土壤有机碳和全氮的分布与土壤中动植物残体分布规律一致。土壤全氮与土壤有机碳作相关性分析,相关系数为0.79(表1),达到极显著相关($P<0.01$),表明土壤氮素主要以有机氮的形式存在于土壤有机质中,因此土壤有机碳的影响因素必然也影响土壤全氮。

少数农业气象站土壤碳氮不随土壤深度的增加而减少,主要分布在辽宁阜新、康平、西丰和凌源等地。这些农业气象站点多分布在辽宁的西部地区。辽西地处丘陵地带、雨量偏少,植被覆盖情况较差,水土流失严重^[16],这可能是影响土壤碳氮剖面分布的主要原因。严重的土壤侵蚀使地表养分流失严重,理化性质恶化,土地生产能力越来越低,从而使土壤表层碳氮含量相对较低。

3.2 土壤碳氮与气象因子的相关性

气象因子对土壤碳、氮的蓄积过程起着重要的作用。一方面,气象条件制约植被类型,影响植被的生产力,从而决定输入土壤的碳、氮的量;另一方面,从土壤碳、氮的输出过程来说,微生物是土壤碳氮分解和周转的主要驱动力,气象条件可通过影响土壤温度、水分和通气状况等,进而影响微生物对有机质的分解和转化^[17]。因此,在农田生态系统中气象因子通过影响作物产量而影响进入土壤的有机物质的数量,同时又强烈影响着土壤有机质的分解与形成。

相关性分析表明,土壤有机碳、全氮与年降水量呈正相关,而与年平均气温呈负相关(表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。年降水量通过影响土壤含水量、土壤透气性而影响土壤固有有机碳的矿化分解和外源有机物的降解,进而影响土壤持有的有机碳量。降水量高,则土壤水分相对较高,土壤透气性相对较差,原有机碳比未降水时矿化慢,外源作物残茬也在水分作用下易于腐烂降解成小分子有机物质,保存于土壤中,从而有利于土壤有机碳含量的提高。土壤表层有机碳和全氮受降水影响大,可能与外源有机残体的腐烂分解主要发生在土壤表层有关。有研究表明土壤碳氮与年平均气温呈负相关^[3,5],这与本研究的结果一致。温度对土壤碳氮的影响较复杂。温度升高,生物产量提高,则归还到土壤中的有机残体增多,有助于土壤碳氮的积累,同

时温度升高也促进有机质的分解。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^[18],同一种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^[19],因此温度对土壤碳氮的影响决定于有机残体的归还量及有机质分解速率的大小。土壤下层与表层相比,外源有机残体相对较少,受降水影响小,土壤碳氮含量主要受土壤有机质分解速率大小的影响,因此受温度影响较大。

地理因子反映了光、温、水等生态因子,因此与土壤碳氮作相关性分析,从侧面反映了水热状况对土壤碳氮的影响。辽宁从南到北热量条件减少,从西向东水分条件递增,经度对土壤碳氮影响大,说明辽宁农田土壤碳氮的空间分布受水分影响较大。辽宁省地理坐标为东经 $118^{\circ}50' \sim 125^{\circ}47'$,北纬 $38^{\circ}43' \sim 43^{\circ}29'$,空间分布显示经度跨度大于纬度,植被的分布特征也更多地表现为东西差异,因此土壤碳氮受经度影响较大。曹宏杰等^[5]研究发现东北样区内土壤有机碳含量、储量和土壤全氮沿纬度呈现南低北高的分布趋势,可见调查区域不同,土壤碳氮的梯度分布特征也不同。辽宁农田土壤碳氮调查中,各样点间海拔差异较小,其对土壤碳氮的影响也较小。经度、纬度和海拔不受其他因素的影响,即为固定值,只能侧面反映水热状况,并不能反映实际状况。

回归方程表明,土壤碳氮除与降水、温度有关外,还受到其他因素的影响。通过偏回归系数可知,土壤表层温度对碳氮的影响大于降水,与王淑平等^[3]的研究结果不一致,这主要是因为东北样带是以水分为主要驱动力。从地理因子与土壤碳氮相关性分析发现,辽宁农田土壤碳氮的空间分布受水分影响较大,这与回归方程的研究结果不一致。另外研究区域不同,其回归方程不同, R^2 也不同,这与研究对象的植被类型,土壤质地、管理方式等都有关系。回归方程可说明土壤碳氮受温度或降水的影响程度,并不能作为机理方程推广使用。土壤碳氮的机理方程还需要结合碳氮循环过程,综合分析各种影响因素。

4 结论

综合分析农业气象站土壤有机碳和全氮的剖面分布特征,总体表现随土壤深度的增加而降低。不同土壤深度,土壤有机碳、全氮受气象因子的影响程度不同。土壤表层土壤碳氮含量受年降水量和年平均气温的综合影响,而土壤下层主要受年平均气温影响。

回归方程表明,土壤表层温度对土壤碳氮的影响大于降水的影响。土壤碳氮受经度影响大,从侧面说明辽宁农田土壤碳氮的空间分布受水分影响较大,但不能说明土壤碳氮的实际影响状况。目前极端天气现象日益频繁,对土壤碳氮必然产生影响,需要进一步研究分析,以期找到影响土壤碳氮的关键气象要素,为未来碳收支评估提供可靠依据。

参考文献:

- [1] 姜勇,庄秋丽,梁文举. 农田生态系统土壤有机碳库及其影响因子[J]. 生态学杂志, 2007, 26(2): 278-285.
JIANG Yong, ZHUANG Qiu-li, LIANG Wen-ju. Soil organic carbon pool and its affecting factors in farm land ecosystem[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2007, 26(2): 278-285.
- [2] 隋跃宇,张兴义,焦晓光,等. 长期不同施肥制度对农田黑土有机质和氮素的影响[J]. 水土保持学报, 2005, 19(6): 190-192, 200.
SUI Yue-yu, ZHANG Xing-yi, JIAO Xiao-guang, et al. Effect of long-term different fertilizer applications on organic matter and nitrogen of black farmland[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2005, 19(6): 190-192, 200.
- [3] 王淑平,周广胜,吕育财,等. 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[J]. 植物生态学报, 2002, 26(5): 513-517.
WANG Shu-ping, ZHOU Guang-sheng, LV Yu-cai, et al. Distribution of soil carbon, nitrogen and phosphorus along Northeast China Transect (NECT) and their relationships with climatic factors[J]. *Acta Phytocologica Sinica*, 2002, 26(5): 513-517.
- [4] 国秀丽. 温度和水分对土壤碳、氮转化影响的研究[D]. 吉林: 吉林农业大学, 2003.
GUO Xiu-li. The effect of temperature and moisture on soil carbon and nitrogen transformation[D]. Jilin: Jilin Agricultural University, 2003.
- [5] 曹宏杰,汪景宽,李双异,等. 水热梯度变化及不同施肥措施对东北地区土壤有机碳、氮影响[J]. 水土保持学报, 2007, 21(4): 122-125, 149.
CAO Hong-jie, WANG Jing-kuan, LI Shuang-yi, et al. Effect of gradients of precipitation and temperature and fertilization on organic carbon and nitrogen of soils in Northeastern China[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2007, 21(4): 122-125, 149.
- [6] 苏永中,赵哈林. 土壤有机碳储量、影响因素及其环境效应的研究进展[J]. 中国沙漠, 2002, 22(3): 220-228.
SU Yong-zhong, ZHAO Ha-lin. Advances in researches on soil organic carbon storages, affecting factors and its environmental effects[J]. *Journal of Desert Research*, 2002, 22(3): 220-228.
- [7] Eswaran H, Vander Berg E, Reich P. Organic carbon in soils of the world [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1993, 57: 192-194.
- [8] 吴海斌,郭正堂,彭长辉. 末次间冰期以来陆地生态系统的碳储量与气候变化[J]. 第四纪研究, 2001, 21(4): 366-376.
WU Hai-bin, GUO Zheng-tang, PENG Chang-hui. Changes in terrestrial carbon storage with global climate changes since the last inter-

- glacial[J]. *Quaternary Sciences*, 2001, 21(4):366-376.
- [9] 国家环境保护总局. 全国生态现状调查与评估 (东北卷)[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2005:183-248.
- State Environmental Protection Administration. National ecological survey and assessment (Northeast volume) [M]. Beijing: China Environmental Science Press, 2005:183-248.
- [10] 洪瑜, 方晰, 田大伦. 湘中丘陵区不同土地利用方式土壤碳氮含量的特征[J]. 中南林学院学报, 2006, 26(6):9-16.
- HONG Yu, FANG Xi, TIAN Da-lun. Soil carbon and nitrogen concentration under different land use in central hilly area of Hunan province[J]. *Journal of Central South Forestry University*, 2006, 26(6):9-16.
- [11] 张心昱, 陈利顶, 傅伯杰, 等. 不同农业土地利用方式和管理对土壤有机碳的影响—以北京市延庆盆地为例[J]. 生态学报, 2006, 26(10):3198-3204.
- ZHANG Xin-yu, CHEN Li-ding, FU Bo-jie, et al. Soil organic carbon changes as influenced by different agricultural land use types and management practices: a case study in Yanqing basin, Beijing [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26(10):3198-3204.
- [12] Arrouay S D, Pellissie R P. Modeling carbon storage profiles in temperate forest humic loamy soils of France[J]. *Soil Science*, 1994, 157:185-192.
- [13] 张金屯. 全球气候变化对自然土壤碳氮循环的影响[J]. 地理科学, 1998, 18(5):463-471.
- ZHANG Jin-tun. Effects of global climate change on C and N circulation in natural soils[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 1998, 18(5):463-471.
- [14] 白军红, 邓伟, 张玉霞, 等. 洪泛区土壤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.
- BAI Jun-hong, DENG Wei, ZHANG Yu-xia, et al. Spatial characteristics of soil organic matter and nitrogen in natural floodplain wetland[J]. *Environmental Science*, 2002, 23(2):77-81.
- [15] 熊汉锋. 梁子湖湿地土壤-水-植物系统碳氮磷转化研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2005.
- XIONG Han-feng. Study on transformation of carbon, nitrogen and phosphorus in soil-water-plant system in wetland of Liangzi Lake[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2005.
- [16] 蔡大为, 黄毅, 王政. 辽西丘陵偏旱区土壤侵蚀与生态建设[J]. 水土保持科技情报, 2002, 3:40-42.
- CAI Da-wei, HUANG Yi, WANG Zheng. Soil erosion and ecological construction in arid hilly side in western Liaoning[J]. *Scientific and Technical Information of Soil and Water Conservation*, 2002, 3:40-42.
- [17] Davidson E A, Trumbore S E, Amundson R. Soil warming and organic carbon content[J]. *Nature*, 2000, 408:789-790.
- [18] Jenkinson D S, Ayanaba A. Decomposition of ^{14}C labeled plant material under tropical condition[J]. *Soil Science Society America of Journal*, 1977, 41:912-915.
- [19] 沈善敏. 中国土壤肥力[M]. 北京: 中国农业出版社, 1998:124-137.
- SHEN Shan-min. Chinese soil fertility[M]. Beijing: China Agriculture Press, 1998:124-137.