

# 矿区复垦地土壤碳氮含量变化特征

刘美英<sup>1</sup>, 高永<sup>1</sup>, 汪季<sup>1</sup>, 金永昌<sup>2</sup>, 龚萍<sup>1</sup>

(1. 内蒙古农业大学 生态环境学院, 呼和浩特 010019; 2. 内蒙古农业大学 信息与网络中心, 呼和浩特 010018)

**摘要:**为阐明矿区复垦对土壤碳氮含量的影响,以神府东胜矿区马家塔露天矿区复垦地为研究对象,比较了复垦区与原状土壤有机质、全氮、碱解氮含量以及碳氮比变化,同时分析了有机质和氮之间的相关性。结果表明:(1)复垦区表层(0—20 cm)土壤有机质含量显著高于下层(20—40 cm),且有机质分布不均衡。和原状土壤相比,复垦地土壤的有机质含量显著增加,C/N 比减小。(2)复垦土壤的全氮和碱解氮含量显著高于原状土壤,碱解氮含量表层显著高于下层,说明复垦后氮素的供应潜力提高。(3)相关分析表明,有机质和全氮之间、有机质与碱解氮之间以及全氮与碱解氮之间均存在显著的线性正相关关系。该研究结果对于评估复垦效应,指导复垦的实践具有重要作用。

**关键词:**矿区;复垦;碳氮

**中图分类号:**S153.6<sup>+</sup>1

**文献标识码:**A

**文章编号:**1005-3409(2013)01-0094-04

## Variation of Soil Carbon and Nitrogen Contents in the Reclamation of Coal Mine Area

LIU Mei-ying<sup>1</sup>, GAO Yong<sup>1</sup>, WANG Ji<sup>1</sup>, JIN Yong-chang<sup>2</sup>, GONG Ping<sup>1</sup>

(1. College of Ecology and Environmental Science, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot

010019, China; 2. Information and Network Center, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010018, China)

**Abstract:** In order to address the effect of reclamation on soil organic carbon and nitrogen contents, the variation of organic matter, total nitrogen, available nitrogen and the ratios of C/N in soil at Shengfudongsheng reclamation of coal mine area were investigated. Furthermore, the correlation between organic matter and nitrogen was analyzed. The results showed that: (1) soil organic matter content in 20—40 cm layer was lower than that in 0—20 cm layer, indicating that the distribution of soil organic matter was not balanced. Soil organic matter content in reclamation area significantly increased and C/N decreased compared to the original soil, which was of great benefit to the accumulation of available nitrogen; (2) total nitrogen and available nitrogen in reclamation area were significantly higher than that of none reclaimed soil. Soil available nitrogen in 20—40 cm layer was significantly lower than that of 0—20 cm soil layer in reclamation area. Potential of nitrogen supplying was greatly improved after reclamation; (3) a significantly positive linear correlation was observed among soil organic matter, total nitrogen content and available nitrogen content. Overall, the research provides a basic information for the evaluation of reclamation and instruction to the reclamation.

**Key words:** coal mining area; reclamation; carbon and nitrogen

土壤有机碳和氮素是土壤养分的重要组成部分,土壤有机质被多数人认为是衡量土壤质量最重要的指标,它能够促进土壤团粒结构的形成,改善土壤结构<sup>[1]</sup>,是各种营养元素特别是氮、磷的主要来源,是酸、碱和有毒物质的良好缓冲剂<sup>[2-3]</sup>。土壤氮素是植

物的养分源,但也会造成水体和大气的污染,进而影响土壤肥力和土壤环境质量<sup>[4-5]</sup>。土壤有机碳和全氮既是作物生长必需的营养元素的主要来源,也是陆地土壤碳库和氮库的重要组成部分,并在一定程度上影响着大气中温室气体的浓度和全球气候变化,成为近

收稿日期:2012-06-13

修回日期:2012-09-19

资助项目:国家科技支撑计划项目(2011BAC07B02-03);内蒙古农业大学创新团队(NDTD2010-11)

作者简介:刘美英(1974—),女,内蒙古清水河县人,博士,讲师,主要从事土壤肥力与植物营养方面的教学与研究。E-mail:liumeiyingimau@163.com

通信作者:高永(1962—),男,内蒙古包头市人,教授,博士生导师,主要从事水土保持与荒漠化防治方面的教学与研究。E-mail:gaoyong315@yahoo.com.cn

年来全球变暖背景下最为关注的热点问题之一<sup>[6]</sup>。土壤有机碳、氮的变化与土壤耕作制度及土地利用方式等因素有着密切的关系<sup>[7]</sup>。土壤氮素供应中,土壤有机质是土壤有机氮的源泉。土壤有机质是由死微生物体、无机氮和活的有机分子构成,其 C/N 较低。C/N 可以反映植物养分利用的效率,控制植物碳生产与养分吸收及植物向土壤归还有机物质与养分的过程<sup>[8]</sup>,对生态系统中碳氮利用、贮存和转移起着决定作用<sup>[9]</sup>。C/N 通常被认为是土壤氮素矿化能力的标志,C/N 低有利于微生物的分解,氮的矿化速率就高<sup>[10-11]</sup>。因此,土壤碳、氮含量及其动态平衡直接影响着土壤肥力和复垦地土壤生产力,而且生态系统中碳循环与氮循环紧密相连,表现出相互耦合作用<sup>[12-13]</sup>,故进行土壤碳氮养分研究具有重要的意义,尤其是在煤矿开采区大面积的复垦地,研究不同复垦植被下土壤碳氮含量特征变化对于复垦成效总结更具有现实意义。

本研究以神府东胜矿区马家塔露天矿区复垦地土壤为研究对象,比较复垦区土壤与原状土壤有机碳与氮含量的变化特征。以期评估复垦对于土壤肥力质量的影响提供基础数据,对其他矿区土壤肥力的恢复实践提供参考。

## 1 研究区概况与研究方法

### 1.1 研究区概况

研究区位于神府东胜矿区马家塔露天采区,地处鄂尔多斯高原东南部,乌兰木伦河右岸 I 级、II 级阶地上。矿区居于沙漠化与水土流失复合侵蚀的中心地带,土地生产力较低,属于干旱半干旱大陆性季风气候,干旱少雨多风沙是其显著特征;地处草原与森林草原的过渡地带,由于人类长期经济活动的影响,地带性土壤基本消失,区内植被稀少,长期受到干旱的威胁,生态环境十分脆弱。

实验区位于乌兰木伦河南北走向的 I 级阶地。其中一块是马家塔矿的原状土壤所在地,至今一直未开采过,植被类型比较单一,以沙生植物为主;另一块实验地位于复垦区内,主要包括混合回填区和分层回填区两种回填类型,且都回填为平地。混合回填是指露采剥离物不分层次混合回填平整,而分层回填则是按剥离顺序回填,均为原位土壤回填,且表层有覆砂或覆土过程,覆砂或覆土深度平均为 15 cm。

### 1.2 研究方法

1.2.1 土样采集 在试验区分别选取混合回填区的油松(*Pinus tabulaeformis*)、油蒿(*Artemisia ordosica* Kraxch)、苜蓿(*Medicago sativa* cv)、侧柏

(*Platycladus orientalis* Linn. Franco)、桧柏(*S. vulgaris* Ant)以及杨树(*Populus*)林和分层回填区的草木樨(*Melilotus officinalis*)地土壤(草木樨 2 代表复垦时间长,草木樨 1 代表复垦时间短)进行采样,同时采集原状土壤。所有的植被都是 2004 年人工种植的(草木樨 2 除外,2006 年种植),其中桧柏和侧柏按照 1 m×1 m 的株行距交错栽植,冠幅 0.5 m;油松按 3 m×3 m 栽植,冠幅 1.5 m;杨树按 2 m×4 m 栽植,冠幅 1 m;苜蓿、草木樨以及油蒿均为撒播种子种植,盖度分别为 80%,80%,75%。分别于 2008 年 5 月、7 月、8 月、9 月、10 月份各采集土样一次。所有土样都采用人工挖剖面 50 cm 深,分 0—20 cm 和 20—40 cm 两个层次,在每个样地上进行随机取样,同一种植被下的土样采集按层次进行了混合,每个样品由 10~15 个取样点混合而成,5 次重复,样品采集好后带回实验室,用于碳氮指标的分析,所有测定数据都是按月测定后再进行平均。

1.2.2 测定方法 土壤有机碳的测定用重铬酸钾容量法<sup>[1]</sup>,全氮测定用半微量开氏定氮法,碱解氮测定采用碱解扩散法。数据处理采用 SAS 9.0,作图在 Excel 中进行。

## 2 结果与分析

### 2.1 复垦土壤氮素形态特征

研究区土壤全氮和碱解氮的变异幅度不一致,全氮的变异系数在 11.53%~33.27%之间,而碱解氮的变异系数为 10.88%~47.68%,表明各氮素对露天开采回填过程、复垦时人为因子及环境因素的敏感程度不同,特别是碱解氮,受人为影响较大,同时也体现出了复垦区土壤氮素的不均衡性,这主要是由于露天开采剥离过程中,扰动了土壤原有的构造结构,将不同土层重新混合起来,所以很大程度上受母质影响,本研究取土层次较浅,故这种变化还未完全显现出来。

全氮含量的高低与碱解氮的高低并不一致,也即全氮含量不缺乏并不意味着碱解氮素供应充足,这主要是因为酸碱度在很大程度上控制着土壤氮素肥力,而土壤氮素主要来源于有机质,复垦区土壤偏碱性,所以容易产生氮的挥发损失,导致全氮含量充足但有效的氮素可能缺乏的情况。另外,不同植被类型下土壤全氮和碱解氮含量也不一致,全氮和碱解氮含量均以苜蓿地和桧柏林下土壤为最高,而且也体现出了复垦时间的影响,同样是草木樨地,复垦时间越长,全氮含量越高。

从表 1 中还可以看出,复垦区土壤表层碱解氮含

量占全氮含量的平均百分比为 10.02%，而原状土壤态氮难以被植物直接利用，还需要经过长期的矿化作用则占到 12.64%，说明复垦土壤中仍有 90%多的有机用进行转化。

表 1 研究区土壤有机质和氮的分布

类型		土层深度/cm	有机质/(g·kg <sup>-1</sup> )	全氮/(g·kg <sup>-1</sup> )	碱解氮/(mg·kg <sup>-1</sup> )	C/N
原状土壤	CK	0—20	2.76±0.32g	0.070±0.012ef	8.85±1.55de	23.8±6.3b
		20—40	1.26±0.14h	0.046±0.005f	3.75±0.52i	16.05±2.81c
复垦土壤	油松	0—20	3.33±0.42f	0.095±0.016cde	7.62±2.37efg	20.99±4.93bc
		20—40	2.53±0.51g	0.095±0.022cde	6.14±2.33fgh	16.25±6.13c
	油蒿	0—20	4.19±0.62de	0.109±0.016bcd	12.27±1.73c	22.83±6.01bc
		20—40	2.9±0.61fg	0.111±0.03bcd	7.26±2.16efgh	15.42±5.87c
	混合苜蓿	0—20	9.9±1.01a	0.151±0.041a	24.23±3.93a	36.19±8.26a
		20—40	3.99±0.46e	0.140±0.044ab	10.52±1.73cd	15.33±3.21c
	杨树	0—20	2.59±0.57g	0.093±0.021cde	7.44±2.46efg	17.01±5.83bc
		20—40	2.61±0.42g	0.095±0.017cde	8.37±1.18ef	16.16±4.29c
	桧柏	0—20	8.03±1.51b	0.140±0.033ab	18.47±2.54b	35.02±9.62a
		20—40	5.29±0.68c	0.123±0.026abc	12.49±2.91c	24.26±5.14b
	侧柏	0—20	2.58±0.51g	0.101±0.025cde	6.09±2.32gh	15.62±4.47c
		20—40	2.6±0.41g	0.094±0.024cde	6.64±1.81efgh	15.6±3.58c
分层回填	草木樨 1	0—20	2.54±0.24g	0.102±0.023cde	5.18±0.56hi	15.31±3.55c
		20—40	3.24±0.37f	0.106±0.034cd	6.93±2.77efgh	20.83±9.79bc
	草木樨 2	0—20	2.77±0.32g	0.088±0.025de	6.84±0.82efgh	20.40±6.72bc
		20—40	3.32±0.50f	0.103±0.034cde	7.73±3.69efg	22.04±9.52bc
	平均	0—20	4.49±0.63d	0.110±0.015bcd	11.02±1.78c	22.92±4.42bc
		20—40	3.31±0.48f	0.108±0.015bcd	8.26±1.91efg	18.24±2.73bc

2.2 复垦土壤全氮与碱解氮的剖面分布

原状土壤以及复垦土壤中全氮含量、碱解氮含量均表现为表层(0—20 cm)高于下层(20—40 cm),全氮含量差异不明显,碱解氮含量差异显著。而且,复垦区不同植被覆盖下的土壤表现不一。对于碱解氮,苜蓿、桧柏、油蒿植被下表层与下层间的差异均十分显著,而且表层显著高于下层,这与表层植物枯枝落叶分解提高有机质有关,因为有机质是氮素的主要来源;对于全氮则或高或低表现不一致,分层回填区的草木樨土壤均表现为下层高于上层,这可能与豆科植物能够固定氮素有关,而其它作物则是根系需要消耗大量氮素供植物生长,但是苜蓿土壤却相反,原因还需进一步验证。所以,从剖面氮素分布来看,全氮作为氮素的基础肥力,复垦土壤显著高于原状土壤,但是复垦土壤上下层之间差异不显著;碱解氮同样是复垦后显著高于原状土壤,表层和下层平均分别高出 2.17,4.51 mg/kg。总体而言,复垦土壤氮素供应的潜力比较好,但是全氮和碱解氮的总体含量比较低,未达到农田土壤水平,还需进一步开展培肥。

2.3 复垦土壤有机质含量变化特征

复垦区土壤有机质的变异幅度较大,表明土壤有机质对复垦管理与规划以及一些人为因子和回填过程等环境因子具有一定程度的敏感性,同时也说明了复垦区有机质分布的不均衡性。复垦区土壤均是表

层有机质含量最高,且除了侧柏林和杨树林土壤外,表层有机质均显著高于下层;分层回填区却表现为下层显著高于上层。这是因为混合回填区地上植物的枯枝落叶或残茬的分解作用在表层表现最为明显,而分层回填由于复垦时间较短,地表覆盖物相对较少而出现相反现象。总体上下层剖面的有机质含量均有下降,一方面植物生长需要有机质的矿质化过程供应养分,另一方面是,随着土层的加深,土壤含水量增加,通透性变差等,都影响着微生物的分解活动而不利于有机质的形成<sup>[14]</sup>。对比原状土壤和复垦土壤可以看出,复垦以后,有机质含量平均增加了 1.89 g/kg,差异显著。而且,尤以混合回填区差异更加明显,最明显的是苜蓿林和桧柏林,这可能与混合回填区复垦时间比较长有关,充分说明了植被恢复良好反过来改善了土壤的质量,二者共同向好的方向发展。值得一提的是分层回填区和原状土壤相比,虽然不存在显著差异,但是已经体现出了分层剥离、分层回填的优越性,在很短的时间内,草木樨生长旺盛,肥田的作用在下层(20—40 cm)已有体现。

2.4 复垦土壤 C/N 特征

表 1 显示,复垦土壤剖面层次的 C/N 与对照土壤对应层次间部分存在显著差异,仍以苜蓿、桧柏植被下差异最显著。分层回填区剖面层次间差异不显著,但是表层 C/N 较相对原状土壤小,说明该区内氮

素还能释放有效氮供植物生长,体现出了表层覆土的优越性。总体上,复垦后,C/N 在表层下降了 0.88,下层却增加了 2.19,差异不显著。除了苜蓿和桧柏林下表层 C/N 大于 25 外,其它均小于 25,说明复垦以后,C/N 整体上变小了,有利于有效氮素的积累,也有利于土壤的不断熟化,使得土壤质量不断改观,但是与农田土壤相比还是比较高,说明复垦区土壤虽然比原状土壤优越很多,但是要想恢复到农田土壤还需要进一步的复垦。

## 2.5 复垦土壤有机质、全氮与碱解氮的相关性

土壤有机质与全氮的相关关系表明(图 1),复垦土壤有机质、全氮之间存在显著的线性正相关关系,但相关系数较小,原因可能是由于回填过程中扰动了土壤原有的土体构造,致使土壤均质性较差,所以土

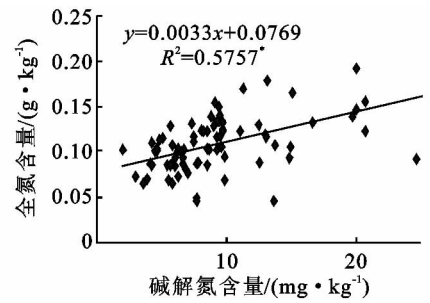
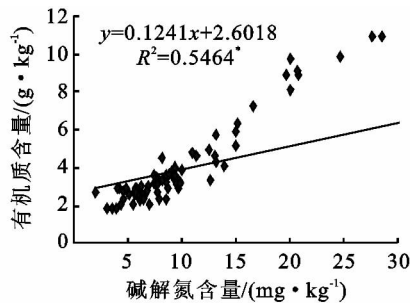
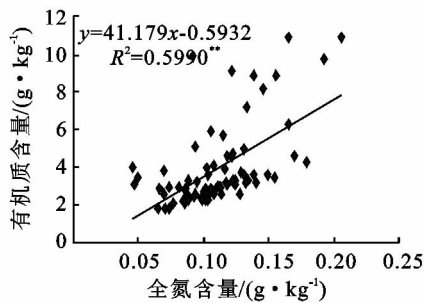


图 1 复垦土壤有机质与全氮相关关系 图 2 复垦土壤有机质与碱解氮相关关系 图 3 复垦土壤全氮与碱解氮相关关系

## 3 结论与讨论

在露天开采的过程中,不论是混合回填还是分层回填都会引起土壤肥力因素及其影响因素的变化,在复垦的过程中,回填土壤的肥力因素由于受到地上植被以及环境的改变而不断的发生变化,这些变化能够在很大程度上指示土壤质量的变化。本研究结果显示,整个复垦区表层土壤有机质含量显著高于下层,且有机质分布不均衡。分层回填区有机质的变异幅度不是很大,混合回填区则总体上变异较大。和原状土壤相比,复垦以后,有机质含量平均增加了 1.89 g/kg,差异显著。复垦以后,C/N 减小,有利于有效氮素的积累,也有利于土壤的不断熟化,使得土壤质量不断改观。大部分植被下(除苜蓿和桧柏)复垦土壤 C/N 都低于 25,表明微生物分解有机质的过程不受氮的限制。

复垦区土壤氮素不均衡,90%以上氮素是植物难以利用的有机态氮,也即全量养分含量高,而有效养分供应并不充足,全量只表示储量,不能指导施肥。整个研究区全氮含量、碱解氮含量均表现为表层高于下层,全氮含量差异不明显,碱解氮含量差异显著。全氮和碱解氮都是复垦土壤显著高于原状土壤,整体

壤有机质、全氮之间的关系较差,在相近的土壤全氮含量下土壤有机质变异很大深层次原因还需进一步的研究来验证。复垦土壤中有机质与碱解氮之间存在显著的正相关关系(图 2),但相关系数同样较小,说明了虽然土壤有机质是土壤有机氮的源泉,但是对于碱解氮,它只包括部分有机质中易分解的、比较简单的有机态氮,而大部分是属于无机矿物态氮(速效氮)。碱解氮可反映土壤近期内氮供应状况,复垦土壤由于回填中的人为影响不一,所以碱解氮和有机质受到植被、环境等的影响表现出不稳定状态,但是随着复垦时间的延长,回填区的土壤也在逐步向好的方向发展。

复垦土壤全氮和碱解氮间的相关关系显著(图 3),但相关系数比较小,进一步说明了全氮含量不缺乏并不意味着碱解氮素供应充足。

上说明复垦土壤比原状土壤的氮素供应潜力好。

研究区有机质和全氮之间、有机质与碱解氮之间以及全氮与碱解氮之间均存在显著的线性正相关关系,充分说明了有机质是土壤有机氮的源泉。说明矿区开采复垦后土壤碳氮变化存在关联性,复垦后土壤化学特征的改变将影响土壤有机碳与氮含量的变化。

## 参考文献:

- [1] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京:中国农业出版社, 1999.
- [2] 徐明岗,于荣,王伯人. 土壤活性有机质的研究进展[J]. 土壤肥料,2000(6):3-7.
- [3] Wander M M, Yang Xueming. Influence of tillage on the dynamics of loose- and occluded-particulate and humified organic matter fractions[J]. Soil Biology & Biochemistry, 2000,32:1151-1160
- [4] 许明祥. 黄土丘陵区生态恢复过程中土壤质量演变及调控[D]. 陕西杨凌:中科院水土保持研究所,2003.
- [5] 俞慎,李勇,王俊华,等. 土壤微生物生物量作为红壤质量生物指标的探讨[J]. 土壤学报,1999,36(3):413-422.
- [6] 刘洁,刘小林,张兴昌,等. 水蚀风蚀交错区不同类型植被对土壤碳氮影响的研究[J]. 水土保持研究,2008,15(6):53-56.

一致<sup>[18]</sup>;同时表层土供水性好于下层,但是在黄土区底层土供水性质要好于表层。这说明土壤质地对于土壤供水性具有决定性作用,而且植物对于其供水性质有一定的改良效果。本研究试验地中,土壤易效水与难效水吸力界点都为 0.3 MPa 左右。

本文通过土壤水分特征曲线,说明了在不同林种和土层深度下土壤持水性、供水性方面有差异也有共性。如果考虑土壤物理性质,其影响情况还需进一步探讨。

参考文献:

[1] 吴文强,李吉跃,张志明,等. 北京西山地区人工林土壤水分特性的研究[J]. 北京林业大学学报,2002,24(4): 51-55.

[2] Gardner W R, Hillel D, Benyamini Y. Post irrigation movement of soil water. II : Simultaneous redistribution and evaporation[J]. Water Resolve Research, 1970, 6 (3):851-861.

[3] 李景保,朱翔,蔡炳华,等. 洞庭湖区湿地资源可持续利用途径研究[J]. 自然资源学报,2002,17(3):387-392.

[4] Van Genuehten M Th. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soil[J]. Soil Science Society of America Journal, 1980, 44 (5): 892-898.

[5] Campell G S. A simple method for determining unsaturated hydraulic conductivity from moisture retention data [J]. Soil Science,1974,117(6):311-314.

[6] 来剑斌,王全九. 土壤水分特征曲线模型比较分析[J]. 水土保持学报,2003,17(1):137-140.

[7] 朱蔚利,肖自幸,牛健植,等. 两种模型对土壤水分特征曲线拟合的比较分析[J]. 湖南农业科学,2011(17):47-51.

[8] 吕殿青,潘云. 六道沟流域不同坡位不同土地利用方式下的土壤持水特征研究[J]. 中国农学通报,2008,24(8): 279-282.

[9] 孟秦倩,王健. 黄土高原坡面刺槐林土壤水分有效性分析[J]. 灌溉排水学报,2008,27(4):74-76.

[10] 张光灿,刘霞,贺康宁,等. 黄土半干旱区刺槐和侧柏林地土壤水分有效性及生产力分级研究[J]. 应用生态学报,2003,14(6):858-862.

[11] 张兴昌,邵明安,黄占斌,等. 不同植被对土壤侵蚀和氮素流失的影响[J]. 生态学报,2000,20(6):1038-1044.

[12] 蒋芳市,黄炎和,林金石,等. 不同植被恢复措施下红壤强度侵蚀区土壤质量的变化[J]. 福建农林大学学报:自然科学版,2011,40(3):290-295.

[13] 查轩,唐克丽,白红英. 植被恢复对土壤抗侵蚀特性影响的研究[J]. 水土保持研究,1993(1):37-43.

[14] 程云,陈宗伟,张洪江,等. 重庆缙云山不同植被类型林地土壤水分特征曲线模拟[J]. 水土保持研究,2006,13 (5):80-83.

[15] 石辉,刘世荣,孙鹏森,等. 森林植被对农业生态环境的调控机理评述[J]. 水土保持研究,2004,11(3):31-34.

[16] 聂立水,李吉跃,戴伟,等. 北京西山油松栓皮栎混交林的土壤水分特征[J]. 林业科学,2007,43(增刊 1):43-47.

[17] 曹扬,赵忠,渠美,等. 刺槐根系对深层土壤水分的影响[J]. 应用生态学报,2006,17(5):765-768.

[18] 李笑吟,毕华兴,张建军,等. 晋西黄土区土壤水分有效性研究[J]. 水土保持研究,2006,13(5):205-208,211.

(上接第 97 页)

[7] 杨洋,王百群,李玉进. 苜蓿对旱地土壤有机碳氮变化的驱动作用[J]. 水土保持研究,2012,19(3):78-81.

[8] Luo Y Q, Currie W S, Dukes J S, et al. Progressive nitrogen limitation of ecosystem responses to rising atmospheric carbon dioxide[J]. Bioscience,2004,54(8):731-739.

[9] Hessen D O, Agren G I, Anerson T R, et al. Carbon sequestration in ecosystems: the role of stoichiometry [J]. Ecology,2004,85(5):1179-1192.

[10] Paul E A, Clark F E. Soil Microbiology and Biochemistry[M]. Academic Press Inc. New York. London, 1989.

[11] Gunther S, Holger K. Buik soil C to N ratio as a simple measure of net N mineralization from stabilized soil organic matter in sandy arable soils[J]. Soil Biology & Biochemistry,2003,35:629-632.

[12] Knops J M H, Bradley K L, Wedlin D A. Mechanisms of plant species impacts on ecosystem nitrogen cycling [J]. Ecology Letters,2002,5:454-466.

[13] Tateno M, Chapin III F S. The logic of carbon and nitrogen interactions in terrestrial ecosystems[J]. The American Naturalist,1997,149(4):723-744.

[14] 朱祖祥. 土壤学[M]. 北京:农业出版社,1985.