

半干旱区土地利用方式对土壤碳氮矿化的影响

杜宁宁¹, 邱莉萍^{1,2}, 张兴昌², 程积民²

(1. 西北农林科技大学资源环境学院, 陕西 杨凌 712100;
2. 中国科学院水利部水土保持研究所, 黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 陕西 杨凌 712100)

摘 要: 通过研究云雾山草原自然保护区草地、农地、灌木林土壤有机碳和氮的含量和矿化特征, 分析了半干旱黄土区不同土地利用方式对土壤碳氮循环的影响。结果表明, 土壤有机碳和全氮平均含量在草地转变为农地后分别降低了 53% 和 64%, 在转变为灌木林地后分别降低了 54% 和 44%。不同土地利用方式下土壤有机碳矿化速率均随土层深度的增加逐渐降低, 降幅介于 29% ~ 46% 之间; 有机碳矿化比例则逐渐增加, 增幅介于 45% ~ 67% 之间。土壤氮素矿化速率、矿化比例和硝化速率均随土层加深逐渐降低, 而且 0 ~ 20 cm 土层氮素矿化体现为硝化过程和铵态氮的固定作用, 且硝化过程占主导作用; 40 ~ 80 cm 土层硝化过程和铵化过程的比例接近, 表明深层土壤氮素矿化由硝化过程和铵化过程共同主导。草地转化为农地和灌木林地后有机碳矿化速率显著降低, 其降低幅度随土层加深逐渐减小; 但有机碳矿化比例则有所增加, 其增幅随土层加深而增大。草地利用方式发生变化后, 土壤氮素矿化速率和矿化比例、硝化速率和铵化速率均显著降低, 这些指标在表层土壤以草地转变为农地后降低较多, 在深层土壤以草地转变为灌木林地降低较多。综上, 半干旱黄土区草地转变为农地和灌木林地后, 土壤碳氮循环强度和有效性显著降低, 因此应避免草地向其它利用方式的转变。

关键词: 半干旱黄土区; 利用方式; 有机碳矿化; 有机氮矿化

中图分类号: S154.1 **文献标志码:** A

Effect of land use on mineralization of soil carbon and nitrogen
in semi-arid grasslands

DU Ning-ning¹, QIU Li-ping^{1,2}, ZHANG Xing-chang², CHENG Ji-min²

(1. College of Resources and Environment, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China;
2. State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: To understand the effects of land use on the cycling of OC and N in soils of semiarid grassland, we analyzed the distribution and mineralization of OC and N in soils collected from grassland, cropland and shrub-land in Yunwu mountain natural grasslands. The results showed that averaged concentration of OC and N in soils decreased by 53% and 64% after conversion of grassland to cropland, and by 54% and 44% after conversion to shrub-land, respectively. The mineralization rate of OC declined with increasing of soil depth, with a range of 29% ~ 46% decrease, while the proportion of mineralized OC increased with soil depth, with a range of 45% ~ 67% increase. The conversion of grassland to cropland or shrubland significantly decreased OC mineralization rate but increased the proportion of mineralized OC. The decrease in OC mineralization rate declined, while increase of OC mineralization proportion increased with soil depth. The metrics of N mineralization declined with soil depth. For the 0 ~ 20 cm depth, the mineralization was characterized by the nitrification and immobilization of ammonium, and was dominated by nitrification. For the 40 ~ 80 cm depth, both nitrification and ammonification contributed to mineralization of N. The conversion of grassland to cropland or shrub-land decreased the metrics of N mineralization. For the top soils, these decreases were greater for the conversion of grassland to cropland, while for the deep soils, the decreases were greater for the conversion to shrub-land, when compared with each other. These results indicated that the cycling and availability of OC and N in grassland were significantly

收稿日期: 2016-07-20 修回日期: 2016-09-26
基金项目: 国家自然科学基金项目(41471244); 省自然科学基金项目(2015JQ4103)
作者简介: 杜宁宁(1990—), 女, 甘肃白银人, 硕士, 研究方向为土壤碳氮循环。E-mail: 1562303945@qq.com。
通信作者: 张兴昌(1965—), 男, 陕西武功人, 研究员, 主要从事生态系统元素循环方面的研究。E-mail: zhangxc@ms.iswc.ac.cn。

decreased after conversion of grassland to cropland or shrub-land in this semiarid region. Therefore, such land use changes should be avoided from the aspect of soil OC and N sequestration.

Keywords: semiarid loess region; land use; organic carbon mineralization; N mineralization

土壤有机碳氮矿化是陆地生态系统碳氮循环的重要环节,也是目前生态学和全球变化研究的热点^[1]。影响土壤碳氮矿化的因素主要包括土壤温度、土壤含水量、pH、土壤微生物、外源有机物和土地利用方式的转变等^[2-3]。其中,土地利用方式转变不但能通过改变土壤有机物质输入和输出量直接影响土壤碳氮矿化^[4],而且可以通过改变土壤理化性状、微生物性质、活性碳氮的含量和组成、土壤温度和水分状况等,间接影响土壤碳氮矿化过程。因此,土地利用方式对土壤碳氮矿化的影响更为复杂,并且会改变土壤碳氮有效性及其在生态系统中的作用^[5-6],是目前的研究热点。

全球干旱半干旱地区占陆地面积的 41%,承载了 38% 的人口,对全球气候变化和人类活动响应敏感^[7-9]。作为干旱半干旱地区重要的生态系统,草地在防治荒漠化和水土流失、维持生态系统功能等方面起着重要作用^[10-11]。然而,随着社会经济的发展 and 土地利用强度的增加,半干旱区草地逐渐转变为其它土地利用方式,生态系统退化加剧^[12-13]。如过去十几年间,草地向其它土地覆盖类型转化的面积以每年 20.87% 的速率增加^[14],造成了严重的土地沙化和退化。因此,有必要研究人类活动对脆弱生态区自然生态系统过程和功能的影响,而土地利用方式变化后土壤碳氮过程的响应特征是该研究的关键^[15-16]。基于此,本研究以半干旱黄土区土地不同利用方式为研究对象,分析了 0~80 cm 土层土壤碳氮含量和矿化指标的响应特征,以期对干旱半干旱区自然生态系统主要生态过程与人类活动之间的互馈关系提供科学依据,并为生态环境脆弱区自然生态系统的可持续发展提供实践指导。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

试验在宁夏固原云雾山草原自然保护区内(106°24'~106°28'E,36°13'~36°19'N)进行。该区位于黄土高原腹地,是我国黄土高原半干旱区面积最大的典型草原生态系统。该区南北长 11 km,东西宽 5.5 km,面积 6 700 hm²。海拔 1 800~2 148 m,年均气温 4℃~6℃,≥0℃的积温 2 370℃~2 880℃,月均温 7 月最高,为 24℃,1 月最低,为 -14℃,年均降水量 400~450 mm,蒸发量 1 500~1 700 mm,无霜

期 112~137 d(4 月中旬至 9 月末)。土壤为黄土母质上发育的灰褐土,主要草地类型有长芒草(*Stipa bungeana*) + 百里香(*Thymus mongolicus*) + 星毛委陵菜型(*Potentilla acaulis*)和长芒草(*Stipa bungeana*) + 铁杆蒿(*Artemisia sacrorum*) + 冷蒿(*Artemisia frigida*) + 星毛委陵菜型(*Potentilla acaulis*),其中丛生禾本科植物本氏针茅在该区分布范围最广。

1.2 土壤样品采集及测定方法

本研究选取地形地势和坡度相似的草地、农田和灌木林地作为研究样地,土地利用方式变化前 3 个样地的土壤类型、植被组成相似,自然条件相同,土壤理化性质相似。草地主要植被为长芒草和铁杆蒿;灌木林地于 1982 年在草地上建植,主要植被为柠条(*Caragana korshinskii* Kom)和少许长茅草;农地于 1982 年由草地开垦而来,主要作物为玉米(*Zea mays* L.)和土豆(*Solanum tuberosum*)。

于 2009 年在各样地随机布设 5 个采样小区(30 m×30 m)。每个小区内随机选取 3 个样点用土钻(直径 9 cm)分别采集 0~10、10~20、20~40、40~60、60~80 cm 土层土壤样品,3 个样点土样分层混合组成混合土样,拣出植物根系和植物残体后,过筛风干备用。

取一部分风干土壤样品研磨过 0.25 mm 筛,用于测定土壤有机碳和全氮含量。土壤有机质和全氮含量用 VARIO EL III CHO 分析仪(Elementar,德国)测定。土壤有机碳矿化采用室内恒温培养-碱液吸收法测定,具体方法为称取 10.0 g 土壤样品置于 250 mL 玻璃组织培养瓶底部,内置盛有 5 mL 0.5 mol·L⁻¹ NaOH 溶液的小玻璃瓶,土壤湿度用蒸馏水调至其田间持水量的 60%,在 25℃ 条件下培养 7 天。分别于培养的第 1、3、5、7 天用 0.5 mol·L⁻¹ 的 HCl 滴定测定 NaOH 溶液吸收的 CO₂ 量,计算培养过程中 CO₂ 的释放量,根据 CO₂ 的释放量计算出培养期内土壤有机碳的矿化量。同时用 KCl 浸提-流动分析仪分别测定培养前后的土壤硝态氮(NO₃⁻)和铵态氮(NH₄⁺)含量,计算土壤氮素矿化量。

1.3 数据分析

采用 Excel 2007 软件对数据进行预处理,采用 SPSS 17.0 软件进行数据统计分析。用 ANOVA 分析方法检验各处理在 $P < 0.05$ 显著水平上的差异,如差异显著采用 Duncan 法在 $P < 0.05$ 显著水平上进

行多重比较。采用 Sigma Plot 10.0 软件作图。

2 结果与分析

2.1 土壤碳氮分布

研究区 3 种土地利用方式下土壤有机碳和全氮含量均随土层深度增加而降低(图 1)。草地、农地和灌木林地土壤有机碳含量分别介于 7.15~21.53、4.84~10.20 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 2.44~9.98 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 之间,全氮含量分别介于 0.75~2.10、0.64~0.76 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 0.25~1.18 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 之间;所有处理 C/N 介于 7~10 之间。

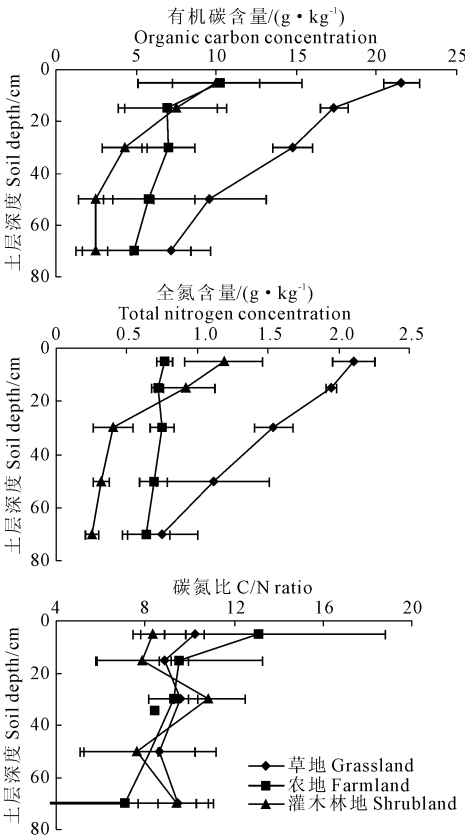


图 1 不同土地利用方式下土壤有机碳、氮和碳氮比的剖面分布特征

Fig.1 Distributions of soil OC, total N concentration and C/N ratio in soil profile under different land use

草地转变为农地和灌木林地后土壤有机碳和全氮含量显著降低,但对土壤 C/N 比影响较小。2 种土地利用转变方式下,0~20 cm 土层有机碳降幅相近,分别为 52.62% 和 53.64%,而草地转变为农地后土壤 0~20 cm 土层全氮含量降低幅度大于转变为灌木林地,降幅分别为 63.69% 和 43.75%;20~80 cm 土层,有机碳和全氮含量的降低均以草地转变为灌木林地较大。

2.2 土壤有机碳矿化特征

研究区草地、农地和灌木林地土壤有机碳矿化速率均随土层深度的增加逐渐降低,降幅分别为 45.87%、28.95% 和 45.02%(图 2);有机碳矿化比例则随土层深度的增加逐渐增加,增幅分别为 44.68%、67.28% 和 64.34%(图 2)。

草地转化为农地和灌木林地后有机碳矿化速率显著降低,其降低幅度随土层深度的增加逐渐减小,而且 2 种土地利用转变方式之间差异不显著,如草地转变为农地后 0~60 cm 土层有机碳矿化速率降低了 25%~43%,转变为灌木林地后 0~80 cm 土层有机碳矿化速率降低了 16%~52%。然而,这 2 种土地利用转变方式增加了有机碳矿化比例,而且其增幅随土层深度的增加而增大,如在草地转变为农地后,随土层深度增加,有机碳矿化比例的增幅从 25.48% 增加到 55.99%,在草地转变为灌木林地后从 36.62% 增加到 61.85%。这些结果表明,半干旱黄土区草地利用方式发生变化后,土壤有机碳的稳定性有所降低,而且深层土壤降低幅度较大。

2.3 土壤氮素矿化特征

研究区 3 种土地利用方式下土壤氮素矿化速率、矿化比例和硝化速率均随土层深度的增加逐渐降低(图 3),其平均值分别从 0~10 cm 的 0.873 $\text{ug}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$ 、0.030 和 2.294 $\text{ug}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$ 降低到 60~80 cm 的 0.014 $\text{ug}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$ 、-0.032 和 0.091 $\text{ug}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$ 。土壤铵化速率则随土层深度的增加逐渐增大,所有处理的平均值从 0~10 cm 的 -1.420 $\text{ug}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$ 增加到 60~80 cm 的 -0.077 $\text{ug}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$ 。此外,硝化和铵化作用占土壤氮素矿化的比例因土层而异,对于 0~20 cm 土层来说,氮素矿化表现为硝化过程和铵态氮的固定作用,而且硝化过程占主导作用,如硝化速率介于 1.345 $\text{ug}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$ 和 3.805 $\text{ug}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$ 之间,而铵化速率介于 -1.660 $\text{ug}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$ 和 -0.785 $\text{ug}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$ 。对于 40~80 cm 土层来说,硝化过程和铵化过程的比例接近,如硝化速率和铵化速率分别介于 0.040~0.387 $\text{ug}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$ 和 -0.385~0.523 $\text{ug}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$,表明深层土壤氮素矿化由硝化过程和铵化过程共同主导。

草地利用方式发生变化后,土壤氮素矿化指标显著降低,其降幅受土地利用变化方式和土层的影响。草地转变为农地后,氮素矿化速率、矿化比例和硝化速率在表层土壤(0~20 cm)降低较多,在深层

土壤(20~80 cm)降低较少;土壤铵化速率降低幅度则与此相反。草地转变为灌木林地后,氮素矿化速率在不同剖面的降幅相差较小,表层土壤硝化速率降低幅度较大,深层土壤较小,而氮素矿化比例和铵

化速率降幅与此相反。此外,土壤氮素矿化指标的降低在表层土壤以草地转变为农地后降低较多,在深层土壤以草地转变为灌木林地降低较多。

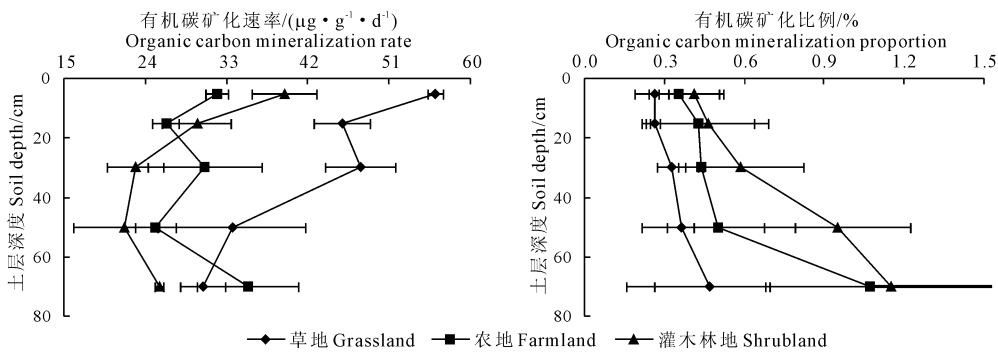


图 2 不同土地利用方式对土壤有机碳矿化速率和矿化比例的影响

Fig. 2 The effect of different land use on soil OC mineralization rate and proportion

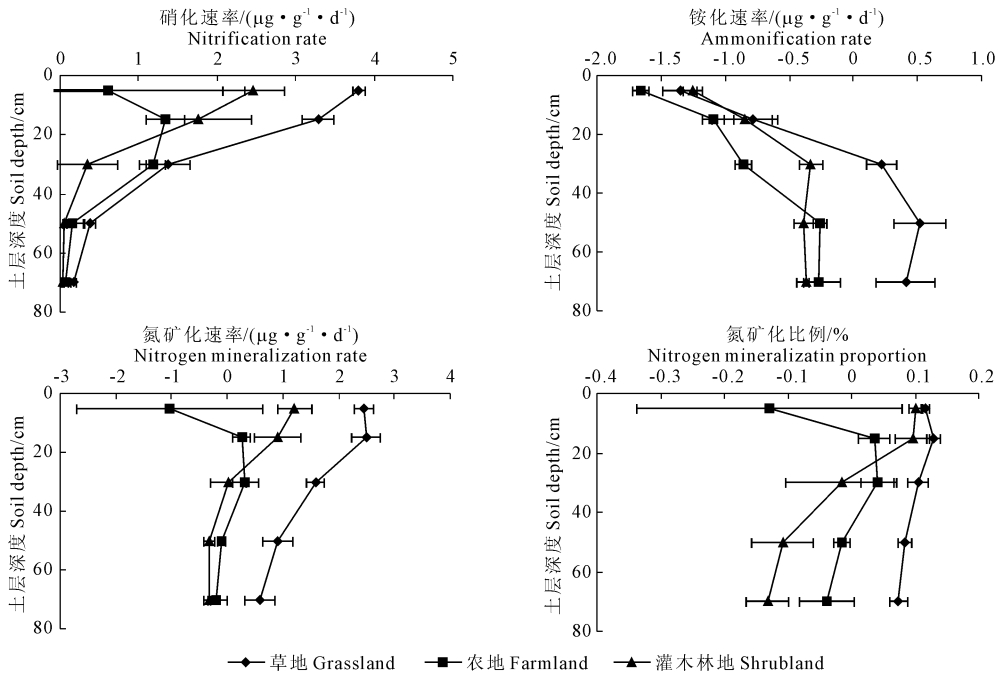


图 3 不同土地利用方式对土壤有机氮矿化的影响

Fig. 3 The effect of different land use on soil N mineralization

3 讨论

3.1 半干旱区土地利用方式变化对土壤碳氮的影响

本研究表明半干旱区土地利用方式发生变化将造成土壤有机碳和全氮的损失。草地转变为农地后土壤有机碳和全氮的降低主要是因为土壤耕作引起土壤结构破坏,造成土壤结构体对土壤碳氮保护作用的减小。如 Qiu 等^[16]在云雾山的研究结果表明,草地开垦后土壤大团聚体含量减少 78%~87%,而土壤有机碳和全氮含量减少 60%。此外,草地转变

为农地后显著降低地上部和根系生物量,进而减少土壤新鲜有机碳和氮素的输入。一方面,草地植物多为多年生植物,地上部生物量会在地表逐年积累,是土壤碳氮的主要来源^[17];而农地地上部生物量在作物收获季节被收获移走,地表所剩余的植物残留物很少^[18],不足以补充土壤有机碳和全氮损失。另一方面,草地根系生物量显著高于农地,而且在土壤剖面的分布较深^[19],草地转变为农地后将会显著降低土壤中根系有机碳和氮的输入,从而造成土壤碳氮损失。农地施肥后也会对土壤碳氮产生影

响。农地施用的氮肥多为化学肥料,施入土壤中会流失一部分^[20],而且作物吸收的氮随着作物的收获而移出^[21],其对土壤氮素的补充有限。化学氮肥的施用还会促进土壤中原有有机碳的矿化损失^[22],造成有机碳含量的降低。

草地转变为林地后土壤碳氮的变化与气候条件有关,如 Wei 等^[23]发现,在黄土高原相对干冷地区,草地转变为林地后土壤碳氮有所损失,而在相对暖湿地区,土壤碳氮有所积累。本研究中,云雾山草原保护区年均温和降水量分别为 6℃ 和 350 ~ 400 mm,属于较为干冷地区,草地转变为灌木林地后不利于地上和地下生物量的形成和恢复,土壤碳氮输入减少。此外,草地转变为林地时对土壤的扰动将会造成土壤结构体的破坏,如 Qiu 等^[24]发现,该区草地转变为柠条林地可以降低 78% ~ 87% 的土壤大团聚体。这些大团聚体的破坏使土壤结构丧失了对土壤碳氮的保护作用,造成了土地利用转变初期的土壤碳氮损失,而由于研究区灌丛生物量较小,这些损失在灌丛建造后不能得到补充,土壤碳氮含量因此显著低于草地土壤。由于土壤碳氮循环过程相互耦合,土壤有机碳和全氮有着较为一致的比例关系^[25],因此本研究中土壤碳氮比不受土地利用方式变化的影响。

3.2 半干旱区土地利用方式变化对土壤碳氮矿化的影响

本研究中草地转变为其它利用方式后有机碳矿化速率显著降低,可能与土壤中有有机碳含量显著降低有关。随着有机碳的损失,可矿化碳的量逐渐减少,矿化速率因此降低。如 Franzluebber 等^[26]研究结果表明农田中土壤有机碳矿化率随土层加深而递减。本研究中土地利用变化后有机碳含量的变化量与矿化速率的变化量呈极显著正相关关系($R^2 = 0.82, P < 0.0001$)。此外,土地利用方式变化后,土壤中活性有机碳的来源和数量也发生变化,并对矿化速率产生影响。如 Blair 等^[27]的研究结果表明新南威尔士地区的天然植被土壤进行耕作后,土壤有机碳、活性有机碳和非活性有机碳含量都有不同程度的下降。此外,这 2 种土地利用变化方式显著增加了土壤有机碳矿化比例,而且深层土壤的增幅大于表层土壤,这是因为土地利用方式发生变化后,土壤有机碳降低幅度(32% ~ 75%)大于有机碳矿化速率(15% ~ 52%),表明草地转变为农地后深层土壤有机碳降低,而且深层土壤有机碳损失的潜力增大,这与王谢等^[28]的研究结果一致。

本研究中上层土壤有着较高的硝化速率,这与上层土壤通气状况较好有关。研究区土壤为轻壤质地,而且年降水量较低,土壤通气良好,有利于土壤硝化过程的进行。此外,上层土壤有机碳和全氮含量较高,为微生物活动提供了较为丰富的碳源和氮源,微生物对土壤无机氮(主要是铵态氮)的固定作用也较强,因此上层土壤铵态氮的微生物固定作用所占比例也较大(负的铵化速率)。对于深层土壤来说,大气中的氧气向下的扩散作用逐渐减弱,硝化作用减弱;同时,由于微生物活动所需的碳源和氮源逐渐减少,微生物对铵态氮的固定作用也降低。本研究中不同土层氮素矿化的主导过程与王玉红等^[29]在相同地区的研究结果一致。

草地转变为农地和灌木林地后,土壤氮素矿化的 4 个指标均显著降低,表明这 2 种土地利用变化方式不但造成了土壤氮素的损失,而且减弱了氮素转化速率和有效性。土壤氮素矿化指标的降低,主要与土壤氮素含量的降低有关,如本研究中土地利用变化后土壤氮素含量的变化量与土壤氮素矿化速率和硝化速率的变化量呈极显著正相关关系($R^2 = 0.828$ 和 $0.838, P < 0.0001$)。此外,这些氮素矿化指标的降低还与土壤微生物活性的降低有关。前期的研究结果表明这 2 种土地利用变化方式分别造成约 45% 和 17.5% 的土壤微生物碳的降低。

土壤碳氮循环与有效性不但与生态系统主要生态过程有关,而且决定着脆弱生态系统的结构和功能^[30],是生态系统稳定性和功能评价的重要指标。本研究结果表明,半干旱黄土区土地利用方式变化后,土壤碳氮循环强度和有效性显著降低,这不但不利于研究区脆弱生态系统功能和结构的维持和稳定,而且使土壤成为大气碳氮的潜在来源。因此,对于半干旱黄土区草地生态系统来说,应该维持现有的草地管理模式,避免草地向农地或其它利用方式的转变。

4 结 论

1) 半干旱黄土区草地转变为农地和灌木林地显著降低了土壤有机碳和全氮含量,但对土壤 C/N 比无显著影响。

2) 研究区土壤有机碳矿化速率均随土层深度的增加逐渐降低,有机碳矿化比例则逐渐增加;氮素矿化速率、矿化比例和硝化速率均随土层加深逐渐降低,而且 0 ~ 20 cm 土层氮素矿化以硝化过程为主;40 ~ 80 cm 土层氮素矿化由硝化作用和铵化作用

共同主导。

3) 草地转化为农地和灌木林地后有机碳矿化速率显著降低,矿化比例则有所增加,氮素矿化指标均显著降低;土壤碳氮矿化指标的变化程度与土层和土地利用变化方式有关。

参 考 文 献:

[1] 邱莉萍,张兴昌.子午岭不同土地利用方式对土壤性质的影响[J].自然资源学报,2006,21(6):965-972.

[2] 王帘里,孙 波.温度和土壤类型对氮素矿化的影响[J].植物营养与肥料学报,2011,17(3):583-591.

[3] 朱剑兴,王秋凤,何念鹏,等.内蒙古不同类型草地土壤氮矿化及其温度敏感性[J].生态学报,2013,33(19):6320-6327.

[4] Murty D, Kirschbaum M U F, Mcmurtrie R E, et al. Does conversion of forest to agricultural land change soil carbon and nitrogen? A review of the literature[J]. Global Change Biology, 2002,8(2):105-123.

[5] 郭建红,潘剑君,葛序娟,等.不同农业利用方式土壤有机碳矿化及其与有机碳组分的关系[J].水土保持学报,2015,29(6):178-183.

[6] 盛 浩,周 萍,李 洁,等.中亚热带山区深层土壤有机碳库对土地利用变化的响应[J].生态学报,2014,34(23):7004-7012.

[7] 周晓兵,张元明.干旱半干旱区氮沉降生态效应研究进展[J].生态学报,2009,29(7):3835-3845.

[8] 郭华东.全球变化敏感因子的空间观测与认知[J].地理教育,2012,25(5):1-1.

[9] 符淙斌,延晓冬,郭维栋.北方干旱化与人类适应—以地球系统科学观回答面向国家重大需求的全球变化的区域响应和适应问题[J].自然科学进展,2006,16(10):1216-1223.

[10] 张雪峰,牛建明,张 庆,等.内蒙古锡林河流域草地生态系统土壤保持功能及其空间分布[J].草业学报,2015,24(1):12-20.

[11] 张晓艳,周正朝.黄土高原地区草地植被调控土壤水蚀机理的研究进展[J].草业科学,2015,32(1):64-70.

[12] 杨 丰,唐文汉,王建立,等.贵州喀斯特山区草地生态系统类型转变对土壤有机碳的影响[J].草地学报,2015,23(4):733-737.

[13] 闫玉春,唐海萍,常瑞英,等.长期开垦与放牧对内蒙古典型草原地下碳截存的影响[J].环境科学,2008,29(5):1388-1393.

[14] 修丽娜,冯琦胜,梁天刚,等.2001—2009 年中国草地面积动态与人类活动的关系[J].草业科学,2014,31(1):66-74.

[15] 邱莉萍,张兴昌,程积民.土地利用方式对土壤有机质及其碳

库管理指数的影响[J].中国环境科学,2009,29(1):84-89.

[16] Qiu L P, Wei X R, Zhang X C, et al. Soil organic carbon losses due to land use change in a semiarid grassland[J]. Plant Soil, 2012,355(1-2):299-309.

[17] Bauhus J, Pare D C, Cote L. Effects of tree species stand age and soil type on soil microbial biomass and its activity in a southern boreal forest[J]. Soil Biology & Biochemistry, 1998,30(8):1077-1089.

[18] 闫景彩.牧草的再生利用与农作物季节性稼穡生物量之比较[J].湖南教育学院学报,2001,(3):156-158.

[19] 李 勇,张晴雯,李 璐,等.黄土区植物根系对营养元素在土壤剖面中迁移强度的影响[J].植物营养与肥料学报,2005,11(4):427-434.

[20] 汪建飞,邢素芝.农田土壤施用化肥的负效应及其防治对策[J].农业环境科学学报,1998,(1):40-43.

[21] 李鹏程,董合林,刘爱忠,等.应用¹⁵N 研究氮肥运筹对棉花氮素吸收利用及产量的影响[J].植物营养与肥料学报,2015,21(3):590-599.

[22] 朱培立,王志明,黄东迈,等.无机氮对土壤中有有机碳矿化影响的探讨[J].土壤学报,2001,38(4):457-463.

[23] Wei X, Shao M, Fu X, et al. Distribution of soil organic C, N and P in three adjacent land use patterns in the northern Loess Plateau, China[J]. Biogeochemistry, 2009,96(1):149-162.

[24] Qiu L P, Wei X R, Zhang X C, et al. Soil organic carbon losses due to land use change in a semiarid grassland[J]. Plant Soil, 2012,355(1-2):299-309.

[25] 王 棣,耿增超,余 雕,等.秦岭典型林分活性有机碳及碳储量垂直分布特征[J].应用生态学报,2014,5(6):1569-1577.

[26] Franzluebbers A J, Stuedemann J A, Schomberg H H, et al. Soil organic C and N pools under long-term pasture management in the Southern Piedmont USA[J]. Soil Biology & Biochemistry, 2000,32(4):469-478.

[27] Blair G J, Lefroy R D B, Lisle L. Soil carbon fractions based on their degree of oxidation and the development of a carbon management index for agricultural systems[J]. Australian Journal of Agricultural Research, 1995,46(7):1459-1466.

[28] 王 谢,李贤伟,范 川,等.林分改造初期整地行为对土壤有机碳、氮和微生物量碳氮及土壤碳库管理指数的影响[J].水土保持学报,2013,27(6):193-198.

[29] 王玉红,马天娥,魏孝荣,等.黄土高原半干旱草地封育后土壤碳氮矿化特征[J].生态学报,2016,37(2):378-386.

[30] 程 琨,岳 骞,潘根兴,等.土壤生态系统服务功能表征与计量[J].中国农业科学,2015,48(23):4621-4629.