

施肥对黄土高原农地土壤碳氮磷生态化学计量比的影响

宋亚辉^{1,2}, 艾泽民³, 乔磊磊⁴, 翟珈莹^{1,2}, 李袁泽⁵, 李秧秧^{1,4}

(1.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;

2.中国科学院大学, 北京 100049; 3.西安科技大学 测绘科学与技术学院, 西安 710054;

4.西北农林科技大学 水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100; 5.西北农林科技大学 林学院, 陕西 杨凌 712100)

摘 要:为了研究不同施肥方式对土壤碳、氮、磷含量和 C : N : P 的影响,以中国科学院安塞水土保持综合试验站作为试验用地,试验共设氮肥(N)、磷肥(P)、有机肥(M)、氮肥+磷肥(NP)、有机肥+氮肥(MN)、有机肥+磷肥(MP)、有机肥+氮肥+磷肥(MNP)、有作物不施肥(CK)和无作物不施肥(BL)9 个处理,采用完全随机区组排列,2011—2013 年连续施肥 3 年,于每年的 10 月份获取土壤样品供测试分析。结果表明:农地施肥显著影响表层(0—20 cm)和表下层(20—40 cm)土壤碳、氮、磷含量,其中,MP 肥配施均能显著提高表层和表下层土壤碳、氮、磷含量,与其 CK 处理相比分别显著增加了 26.9%~55.2%, 24.0%~57.5%, 10.4%~42.5%。相比于表层土壤,表下层土壤碳、氮、磷含量受施肥年限的影响更为明显。农地施肥显著影响土壤 C : P 和 N : P,以单施 M 肥或 MN 配施最为显著;MP 肥配施则显著提高了表下层土壤 C : P,为 14.2%~18.8%。施肥年限对农地表下层土壤 C : N : P 的影响更为明显,NP 或 MN 肥配施时影响最大。表层与表下层土壤 C : N : P 之间具有明显差异,单施 M 肥时二者之间的差异最为显著,分别达到 14.5%~16.2%, 56.6%~71.9%, 46.5%~52.2%。施肥对农地土壤碳、氮、磷含量及其 C : N 和 N : P 有显著影响,不同施肥处理对不同土层土壤影响不一致,且随施肥年限增加而变化,总的来说 MN 或 MP 配施变化更为明显。

关键词:农地; 施肥; 年限; 土层; 化学计量比

中图分类号:S153.6⁺1

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2019)06-0038-08

Effects of Fertilization on Ecological Stoichiometric Ratio Soil Carbon, Nitrogen and Phosphorus in Farmland of the Loess Plateau

SONG Yahui^{1,2}, AI Zemin³, QIAO Leilei⁴, ZHAI Jiaying^{1,2}, LI Yuanze⁵, LI Yangyang^{1,4}

(1.State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau,

Institute of Soil and Water Conservation, CAS&MWR, Yangling, Shaanxi 712100, China; 2.University of

Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3.College and Geomatics, Xi'an University of Science &

Technology, Xi'an 710054, China; 4.Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling,

Shaanxi 712100, China; 5.College of Forestry, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: In order to study the effects of different fertilization methods on soil carbon, nitrogen, phosphorus content and soil C : N : P, the experiment was conducted at the Ansai Research Station of Soil and Water Conservation of the Chinese Academy of Sciences. The experiment was consisted of 9 treatments: Nitrogenous fertilizer (N), Phosphate fertilizer (P), Organic manure (M), Nitrogenous fertilizer + Phosphate fertilizer (NP), Nitrogenous fertilizer + Organic manure (MN), Phosphate fertilizer + Organic manure (MP), Nitrogenous fertilizer + Phosphate fertilizer + Organic manure (MNP), crops without fertilization (CK) and no crop or fertilization (BL). All treatments were arranged in a completely randomized block design. Continuous fertilization for three years from 2011 to 2013, and soil samples were randomly collected from each treatment in October of each year after harvest and then prepared for analysis. The farmland fertilization would significantly affected the surface (0—20 cm) and shallow (20—40 cm) soil carbon, nitrogen and phosphorus concentrations, and MP fertilizer application can significantly improve the surface and shallow soil carbon, nitrogen and phosphorus concentrations, when compared CK treatment were increased by 26.9% to 55.2%, 24.0% to 57.5% and 10.4% to 42.5%, respectively. The effects of the age of fertilization

收稿日期:2019-01-03

修回日期:2019-02-19

资助项目:十三五国家重点研发计划(2016YFC0501707);国家自然科学基金(41771557)

第一作者:宋亚辉(1994—),女,河南焦作人,硕士研究生,研究方向为流域生态学。E-mail: songyahh@163.com

通信作者:李秧秧(1968—),女,陕西咸阳人,研究员,博士生导师,主要从事植物水分生理生态研究。E-mail: yyli@ms.iswc.ac.cn

on soil carbon, nitrogen and phosphorus concentrations was more obviously in the shallow soil than that in the surface soil. Fertilization had an significantly affected on soil C : P and N : P. MP fertilizer could significantly increase the shallow soil C : P with 14.2% to 18.8%. The effect of the age of fertilization on C : N : P of shallow soil was more obvious, and the effect was the most significant with NP or MN fertilizer. The difference between surface and shallow soil C : N : P were obvious, and the different was the most significant, which reached 14.5% to 16.2%, 56.6% to 71.9% and 46.5% to 52.2%, respectively. Fertilization had a significant influence on farmland soil carbon, nitrogen and phosphorus concentrations, and C : N and N : P. The effect of different fertilization treatments on different soil layers was different, and it was change with the increase of the age of fertilization. The changes were more clearly with the MN or MP fertilizer.

Keywords: farmland; fertilization; age; soil layer; stoichiometric ratio

作为生态化学计量学的重要分支学科,土壤生态学计量学是一门主要研究土壤内部养分(碳、氮、磷等)循环和平衡的学科,其化学计量比可以反映土壤肥力状况、土壤有机质构成、质量状况和养分供给能力,以及土壤碳、氮、磷等养分的矿化状态^[1-2]。土壤养分(碳、氮、磷等)是影响生态系统结构和功能的主要因素之一,其含量状况对植物的生长和生产力水平有着重要影响作用^[3],因此,土壤碳、氮和磷含量及其元素化学计量比对维持生态系统的可持续性和生产力起着关键性作用^[4]。研究土壤碳、氮和磷含量及其化学计量比对揭示土壤养分的有效性、碳、氮、磷等元素的循环与平衡作用具有重要意义,了解土壤碳、氮和磷元素化学计量比状态有助于提高我们理解陆地生态系统的养分循环和生物过程^[5-6]。黄土高原农业区是我国西北地区重要的耕地资源,是我国重要的潜在粮食生产区之一,该地区降雨量小,水土流失严重,土壤肥力低下,其土壤肥力和水分是限制该地区农作物生产力的主要因素,因此,提高土壤肥力是提高黄土高原地区粮食作物产量的主要手段之一^[7]。20 世纪 80 年代以来,由于采取肥料投入、品种改良、水土治理等多种措施,该地区土壤生产力明显提高^[8]。作为提高土壤肥力、增产粮食作物产量的主要手段,施肥对该地区土壤养分含量和作物产量影响的研究已有大量报道。研究结果表明,单施化肥^[9-12]、单施有机肥^[9,11-13]、化肥配施^[11,13]或有机肥与化肥配施^[9,11-13]会显著提高农地耕作层土壤碳、氮、磷含量和作物产量。这与其他地区农地施肥研究结果一致,施肥对土壤碳、氮、磷含量和作物生产力有显著提高作用^[14-21]。也有研究发现,单施化肥或有机肥没有提高土壤有机碳含量,土壤碳含量反而降低^[14,22-23]。施肥对土壤碳、氮、磷含量的影响会因土壤类型、种植作物、地区气候、轮作方式等不同而产生差异^[21,24]。当前对农地的研究多集中在施肥对作物产量和土壤碳、氮、磷含量等土壤肥力方面,较少研究施肥对土壤碳、氮、磷生态化学计量比的影响。本文以黄土高原地区的中国科学院安塞水土保持综合试验站开展长期定位研究试验的川地为基础,系统分析

2011—2013 年川地施肥试验对土壤碳、氮、磷含量及其化学计量比的影响,揭示土壤生态功能对农地施肥的响应,以期为该地区合理施肥提供理论依据。

1 材料和方法

1.1 研究区概况

本试验于 2011—2013 年在中国科学院安塞水土保持综合试验站进行,该试验站位于中国西北部的黄土高原中部地区(36°31′—37°20′N,108°52′—109°26′E),海拔 1 068~1 309 m。属于温带半干旱气候,年均温 8.8℃,年降雨量大约 505 mm,多暴雨,70%的降雨集中在每年的 7—9 月,无霜期 157 d 左右。土壤类型为典型黄绵土。土壤养分贫瘠,缺氮少磷。因受灌溉条件所限,主要靠天然降水,属雨养农业地区,农作物一年一熟,以秋收作物为主。

1.2 试验设计

试验地设置在中国科学院安塞水土保持综合试验站的墩滩川地养分长期定位试验地,试验地从 1997 年开始布设,1998 年开始施肥处理,作物轮作方式为玉米—玉米—大豆,3 年轮作一次,2011 年、2012 年、2013 年种植的分别是玉米、玉米和大豆。试验地总面积为 378 m²,每个试验小区的面积为 14 m²。试验地共设 9 个试验处理,分别为氮肥(N)处理、磷肥(P)处理、有机肥(M)处理、氮肥+磷肥(NP)处理、有机肥+氮肥(MN)处理、有机肥+磷肥(MP)处理、有机肥+氮肥+磷肥(MNP)处理、有作物不施肥(CK)处理和无作物不施肥(BL)处理,每个处理均设置 3 个试验小区重复,完全随机区组排列。氮肥施用的是尿素,磷肥是过磷酸钙,有机肥是羊粪。折算后的施肥量分别是:N,97.5 kg/hm²;P,75.0 kg/hm²;M,7 500 kg/hm²。施肥方法:P 肥和 M 肥作为种肥一次性施入,N 肥 20%作种肥,N 肥剩余 80%作追肥。本试验在长期定位试验地上,于 2011—2013 年,开展了为期 3 a 的研究结果。

1.3 样品采集和分析

试验在农作物收获后,于每年的 10 月份在每个试验小区分表层(0—20 cm)和表下层(20—40 cm)

两层采集土壤样品,每个试验小区各土层土样采集时均按多点采样后混匀为一个土壤样品。土壤样品在实验室自然风干后去除植物根系、植物残体、小石子等,然后粉碎过 0.25 mm 筛后保存起来用于土壤有机碳、全氮和全磷的测定。土壤有机碳采用重铬酸钾容量法—外加热法测定,全氮采用凯氏定氮法测定,全磷采用钼锑抗比色法测定^[25]。

1.4 数据处理

采用 Excel 2010 对试验数据进行整理,统计软件 SPSS 20.0 对数据进行统计分析,多重比较采用 LSD(Least Significant Difference)法,显著水平为 $\alpha=0.05$ 。采用 SigmaPlot 12.5 作图。

2 结果与分析

2.1 施肥对土壤有机碳、全氮、全磷含量及碳：氮：磷的影响

2.1.1 土壤碳、氮和磷含量 2011—2013 年表层

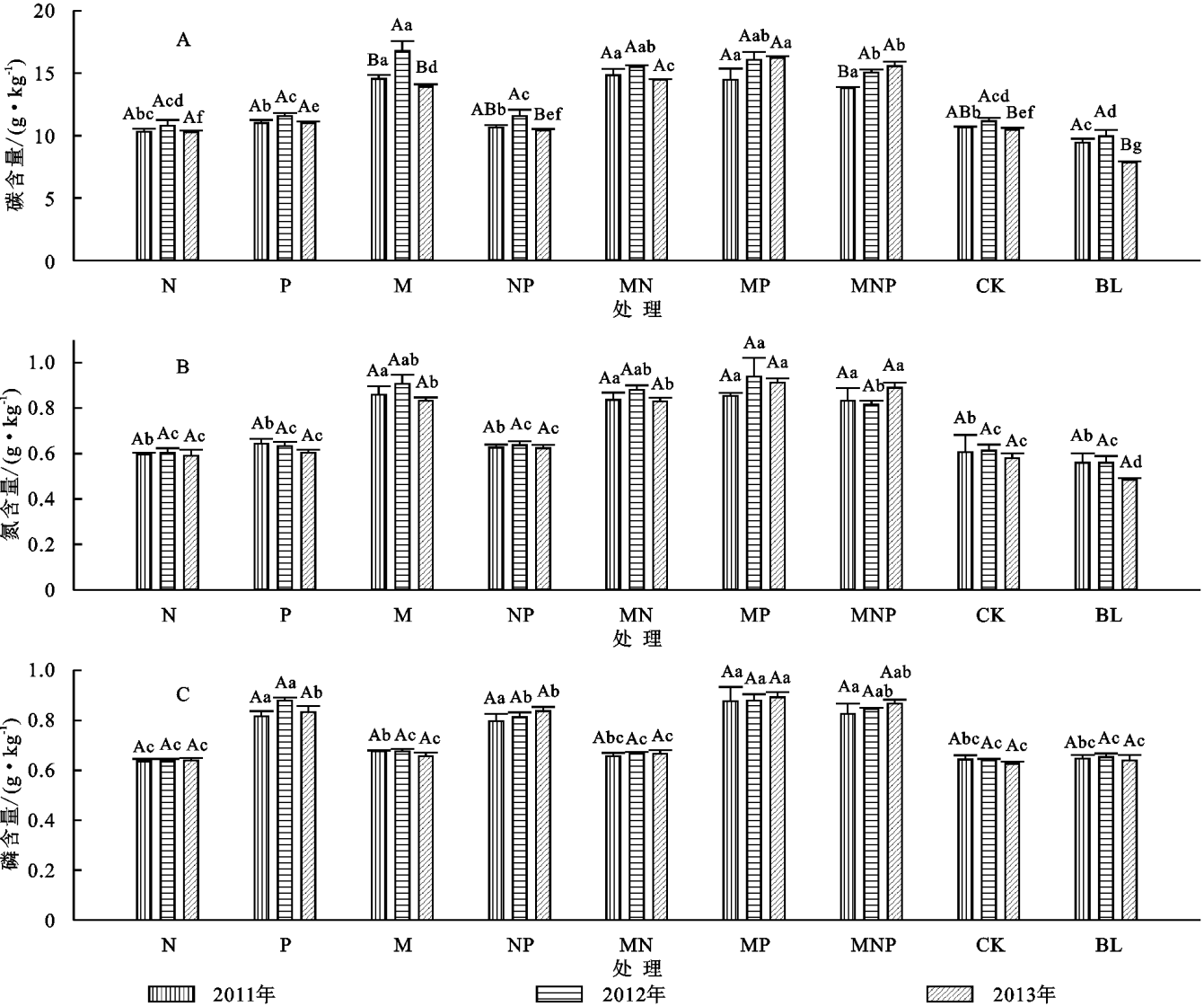
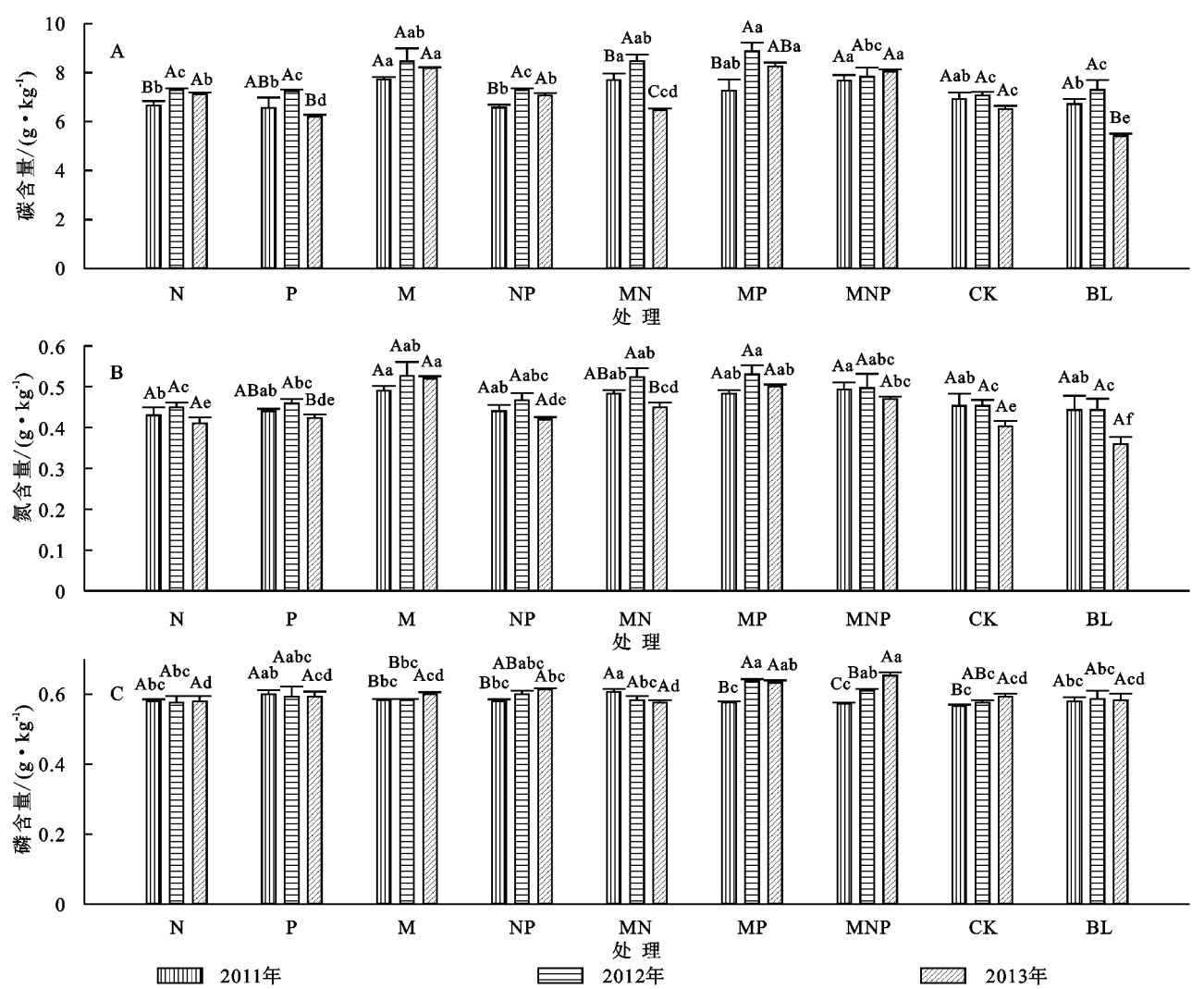


图 1 不同施肥处理和施肥年限表层土壤碳、氮、磷含量

(0—20 cm)土壤碳、氮和磷含量分别为 7.86~16.80, 0.48~0.94, 0.63~0.89 g/kg(图 1)。各年限施肥处理对表层土壤碳、氮和磷含量均有显著影响,MP 和 MNP 处理表层土壤碳、氮和磷含量均显著高于其 CK 处理,分别为 29.4%~55.2%, 33.2%~57.5%, 28.5%~42.5%(图 1)。研究表明,MP 或 MNP 肥配施均能显著提高农地表层土壤碳、氮和磷含量。

表下层(20—40 cm)土壤碳、氮和磷含量分别为 5.41~8.89, 0.36~0.53, 0.57~0.65 g/kg,施肥处理对表下层土壤碳、氮和磷含量均有显著影响(图 2)。除 2011 年外,2012 年、2013 年的 M 和 MP 处理表下层土壤碳和氮含量均显著高于其 CK 处理(图 2A 和 B)。不同于土壤碳和氮含量,2011 年 P 和 MN 处理表下层土壤磷含量均显著高于其 CK 处理;2012 年、2013 年则是 MP 和 MNP 处理(图 2C)。研究结果表明,MP 肥配施能显著提高表下层土壤碳、氮和磷含量。



注:不同小写字母表示同一施肥年限不同处理间差异显著($p=0.05$);不同大写字母表示同一处理不同施肥年限间差异显著($p=0.05$),下同。

图 2 不同施肥处理和施肥年限表下层土壤碳、氮、磷含量

2.1.2 土壤碳氮磷比 与其 CK 相比,除 2013 年 M 和 NP 处理外,2011 年、2012 年施肥处理对表层土壤 C : N 均无显著影响(图 3A)。施肥处理对各年限表层土壤 C : P 和 N : P 均具有显著影响,与其 CK 相比,各施肥年限 M 和 MN 处理表层土壤 C : P 和 N : P 均显著增高了 28.0%~42.7%,30.0%~35.3% 和 34.3%~39.3%,33.7%~37.6%,P 和 NP 处理均显著降低(图 3B—C)。结果表明,单施 M 或 MN 肥配施显著提高表层土壤 C : P 和 N : P,单施 P 或 NP 肥配施均显著降低表层土壤 C : P 和 N : P。

各施肥年限中,仅 2013 年 P 和 MN 处理表下层土壤 C : N 显著低于其 CK 处理(图 4A)。除 2011 年外,2012 年、2013 年的 M 和 MP 处理土壤 C : P 均显著高出其 CK 处理 17.8%~24.3% 和 14.2%~18.8%(图 4B)。土壤 N : P 仅 2013 年的 M, MN 和 MP 处理显著高出其 CK 处理 27.6%,14.6%,15.7%(图 4C)。研究结果表明,MP 肥配施时会显著影响表下层土壤 C : P 和 N : P。

2.2 施肥年限对土壤碳、氮、磷含量及 C : N : P 影响

2.2.1 土壤碳、氮和磷含量 施肥年限对表层土壤部分处理碳含量具有显著影响,其中,M 和 NP 处理表层土壤碳含量均以 2012 年最大,分别比 2013 年显著高出 20.7%,11.2%;MNP 处理则以 2013 年最大,比 2011 年显著高出 12.8%(图 1A)。不同于表层土壤碳含量,施肥年限对表层土壤氮和磷含量均无显著影响(图 1B—C)。

除 M 和 MNP 处理外,施肥年限对其他各施肥处理表下层土壤碳含量均有显著影响,均以 2012 年碳含量最大(图 2A)。施肥年限对 P 和 MN 处理表下层土壤氮含量有显著影响,均以 2012 年最大(图 2B)。对于表下层土壤磷含量而言,施肥年限对 M, NP, MP 和 MNP 处理均有显著影响,其中,除 MP 处理以 2012 年最大,其他处理均以 2013 年最大(图 2C)。研究表明,表下层土壤碳、氮和磷含量比表层土壤受施肥年限的影响更为明显。

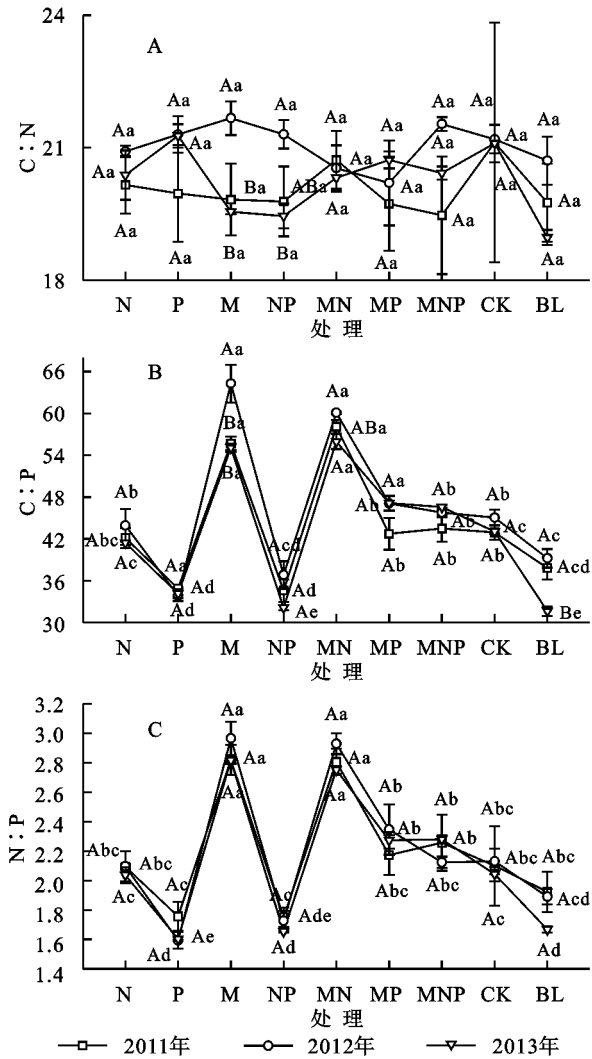


图 3 不同施肥处理和施肥年限表层土壤碳：氮：磷

2.2.2 土壤 C : N : P 施肥年限对 M 处理表层土壤 C : N 和 C : P 均具有显著影响,以 2012 年最大,分别比 2013 年显著高出 10.9%,16.7%(图 3A—B)。施肥年限对各施肥处理表层土壤 N : P 无显著影响(图 3C)。研究表明,单施 M 肥的处理表层土壤 C : N 和 C : P 受施肥年限的影响较为显著。

MN 处理表下层土壤 C : N, C : P 和 N : P 均以 2012 年最大,比 2013 年分别显著高出 13.2%,30.3%和 15.1%。NP 处理同样对土壤 C : N, C : P 和 N : P 均具有显著影响, C : N 以 2013 年最大, C : P 以 2012 年最大,分别比 2011 年显著高出 11.8%和 7.4%; N : P 则以 2012 年最大,比 2013 年显著高出 14.0%(图 4)。研究表明,相比于表层土壤,表下层土壤 C : N : P 则受施肥年限影响更为明显,以 NP 或 MN 肥配施时效果更为显著。

2.3 施肥对不同土层土壤碳、氮、磷含量及 C : N : P 之间差异的影响

各年限不同处理表层土壤和表下层土壤的碳、氮、磷含量之间均具有显著差异,其中,2011 年表层土壤和表下层土壤碳、氮和磷含量之间的差异均以

MP 处理最大;2012 年碳含量以 M 处理差异最大,氮含量以 MP 处理最大,磷含量则以 P 处理最大;2013 年碳含量则以 MN 处理最大,氮含量以 MNP 处理最大,磷含量则以 MP 处理最大(表 1)。结果表明,MP 处理对各年限表层和表下层土壤碳、氮和磷含量之间差异的影响最为明显。

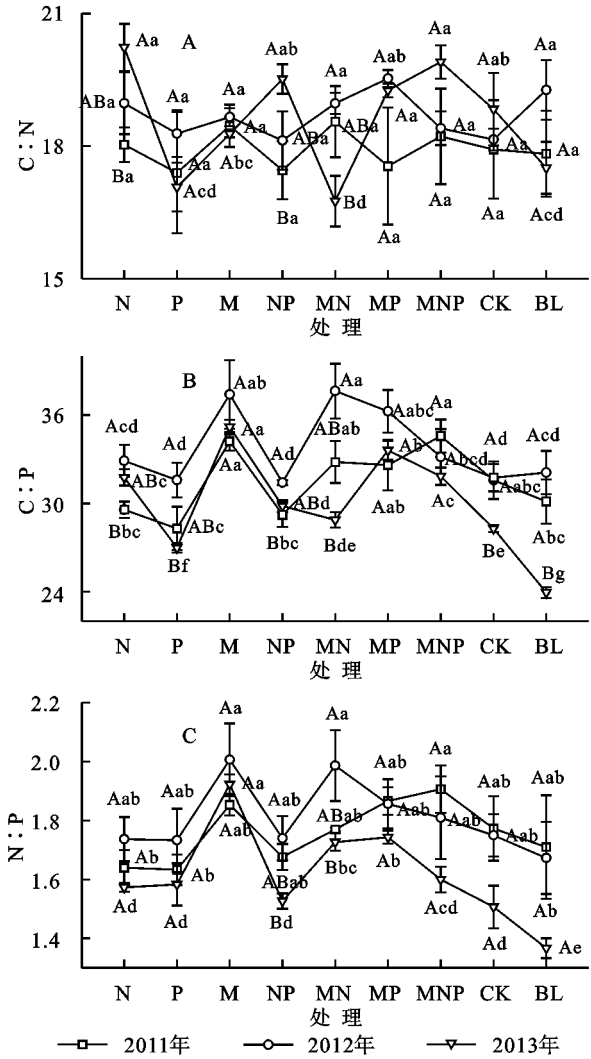


图 4 不同施肥处理和施肥年限表下层土壤碳：氮：磷

除 N 处理外,2011 年各施肥处理表层土壤和表下层土壤 C : N 之间并无显著差异;2012 年、2013 年只有部分施肥处理表层土壤和表下层土壤 C : N 之间具有显著差异,其中 P 和 M 处理均有显著差异(表 1)。除 2012 年 P 和 NP 处理外,各年限施肥处理表层和表下层土壤 C : P 均具有显著差异(表 1)。各年限施肥处理表层土壤与表下层土壤 N : P 之间差异并不一致,其中,各年限 N, M 和 MN 处理的表层与表下层土壤 N : P 之间均具有显著差异(表 1)。总的来说,单施 M 肥时会造成表层和表下层土壤 C : N, C : P 和 N : P 之间的显著差异,表层土壤分别比表下层土壤高出 14.5%~16.2%,56.6%~71.9%,46.5%~52.2%。

表 1 表层与表下层土壤碳、氮、磷含量及其化学计量比差异

项目	年份	处理								
		N	P	M	NP	MN	MP	MNP	CK	BL
碳含量	2011	***	***	***	***	***	**	***	***	**
	2012	***	***	***	***	***	***	**	NS	NS
	2013	**	***	***	*	*	*	**	*	*
氮含量	2011	*	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS
	2012	***	*	***	*	***	*	*	**	*
	2013	**	NS	***	NS	***	NS	NS	NS	NS
磷含量	2011	***	***	***	***	***	***	***	***	*
	2012	**	***	**	**	***	**	***	**	*
	2013	*	***	***	***	**	***	***	**	NS
碳氮比	2011	NS	*	**	*	NS	NS	**	**	NS
	2012	*	NS	**	NS	***	**	**	***	*
	2013	*	NS	**	NS	**	NS	NS	*	NS
碳磷比	2011	***	***	***	***	***	***	***	***	***
	2012	**	***	***	***	***	***	***	**	**
	2013	*	***	*	***	*	***	***	NS	NS
氮磷比	2011	NS	**	***	NS	**	**	NS	NS	NS
	2012	***	***	**	*	***	***	***	***	***
	2013	***	NS	***	**	***	***	***	**	**

注: NS 表示 $p>0.05$; * 表示 $p<0.05$; ** 表示 $p<0.01$; *** 表示 $p<0.001$ 。

3 讨论

3.1 施肥对土壤碳、氮和磷含量影响

本文研究表明,施肥处理对农地表层(0—20 cm)和表下层(20—40 cm)土壤碳、氮和磷含量均有显著影响,这与前人研究结果一致^[9-21]。有研究发现,单施化肥或有机肥对农地土壤碳含量影响不显著^[14,22-23,26],本文 2011 年、2012 年的施肥试验也发现,单施 N 或 P 肥或 NP 配施处理的土壤碳含量与 CK 土壤碳含量之间并没有显著差异。胡诚等^[14]认为单施有机肥对表层(0—20 cm)土壤碳含量没有显著影响,这与本文研究结果不一致。产生这种结果差异的原因可能是农地土壤类型、作物种类、区域气候等不同^[24]。再者,本研究中的有机肥是羊粪,有机肥本身碳含量的差异也可能会造成这种差异。研究发现,在该地区农地进行 MP 肥配施,可以显著提高农地表层和表下层土壤碳、氮和磷含量,这与 Guo 等^[9]在陕西长武的研究结果一致,可见 MP 肥配施,可以有效提高农地土壤碳、氮和磷含量。

施肥年限对部分施肥处理的表层土壤碳含量有显著影响,而对表层土壤的氮和磷含量无显著影响;施肥年限对部分施肥处理的表下层土壤的碳、氮和磷含量均有显著影响。有研究发现,长期施用无机或有机肥料可以显著提高表层土壤碳、氮和磷含量^[9,11-12,16,18-19,21];也有研究表明长期施用无机肥对表层土壤碳含量影响并不显著^[14,17,27],或长期施用有机

肥会导致土壤磷含量的显著降低^[26]。研究结果因研究地区气候、土壤条件、施肥方式、耕作制度等不同具有较大差异^[21]。本文施肥试验的研究结果是源于长期施肥试验的一部分,这种短期内的施肥效应可能与长期施肥结果有一定的差异。

研究发现各施肥年限的不同施肥处理表层土壤碳、氮和磷含量均显著高于表下层土壤。由于土壤养分的提高主要途径是外源养分的输入,对农地而言,作物的光合产物^[13]有机物,光合产物输入首先影响的就是表层土壤养分含量^[16]。土壤氮、磷含量,尤其是磷,主要来源于肥料的输入,而肥料输入得累积也会首先发生在表层土壤^[28],因此,与表下层土壤相比,表层土壤拥有更高的碳、氮和磷含量。这与他人研究结果一致^[21]。但不同施肥处理的影响并不一致,当 MP 配施时,表层与表下层土壤碳、氮、磷含量之间的差异更为明显。

3.2 施肥对土壤 C : N : P 的影响

3.2.1 施肥对土壤 C : N 的影响 土壤 C : N 可以敏感地反映土壤质量状况,如土壤有机质状态、养分有效性、碳沉降、供氮水平和微生物数量及活性,并影响到土壤碳和氮的循环^[5,29]。土壤 C : N 与有机碳的分解速度成反比^[2]。C : N 较低时,微生物活性相对较高,土壤有机碳的矿化速率就会加快,则有机碳含量下降^[2];C : N 较高时,土壤有机碳含量处于增加状态^[29]。本文研究发现,相比 CK 处理,2013 年 M 和 NP 处理的表层土壤 C : N 显著降低;在表下层土

壤, P 和 MN 处理的土壤 C : N 显著低于 CK 处理。因此, 施 M 肥可能会降低土壤 C : N, 提高微生物活性, 从而降低了土壤有机碳含量。施用有机肥有利于微生物生长繁殖^[30], 因此微生物量的提高可能会造成土壤有机碳含量的降低^[14]。相比 2013 年、2011 年和 2012 年施肥处理土壤 C : N 与其 CK 处理之间并无显著差异, 可能是因为作物种类或气候差异不同所引起的。

土壤 C : N 较低时表明土壤有机碳矿化较快, 随着土层深度的增加, C : N 一般会降低^[2]。本研究中, 2012 年、2013 年的施肥处理中, P 和 M 肥处理表层土壤 C : N 显著高于其表下层土壤。但总体上, 本文表层土壤 C : N 与表下层土壤 C : N 之间的差异并不显著, 可能是因为表下层土壤采样深度过浅, 未达矿物层的缘故, 同时, 不同生态系统土壤的 C : N 维持会在一个相对稳定的范围^[31-32]。这也与化学计量的基本原则一致, 有机物质是由一定数量的氮和其他养分及相对固定比率的碳而构成^[33]。本文研究发现, 只有配施 NP 肥的表层土壤和表下层的 C : N 在不同施肥年限间具有显著差异。总的来说, 不同施肥处理、不同施肥年限和不同土层的土壤 C : N 变异性并不大。考虑到碳和氮元素作为结构性元素, 它们积累和消耗过程处于一个相对固定的比率^[32], 因此土壤 C : N 一般相对稳定。

3.2.2 施肥对土壤 C : P 的影响 土壤 C : P 常被用来表征土壤有机碳的分解和积累, 其磷富集程度和有效性可以在一定范围内指示土壤的肥力, 也可以影响植物养分的积累和分布^[34]。土壤 C : P 是判断有机碳矿化过程中磷素的释放或吸收的一个的重要指标, 其与微生物释放磷元素的潜力呈反比关系, C : P 较低时会有较强的磷素释放能力; C : P 较高时会引发同化作用, 土壤微生物和植物之间是竞争关系, 将吸收后的磷固持在土壤中^[35]。C : P 比 C : N 拥有更大的变异范围, 这是土壤磷的来源造成的^[36]。这与本文研究结果一致。本文研究发现, 不同施肥年限的表层土壤 C : P 均以 P 和 NP 处理显著低于 CK 处理, 以 M 和 MN 处理显著高于 CK 处理。除 2011 年外, 2012 年、2013 年表下层土壤 C : P 均以 M 和 MP 处理显著高于 CK 处理。因此, 在该地区单施 P 肥或 NP 肥配施, 可以明显促进表层土壤中的微生物对磷的释放能力, 为作物生长提供磷元素; 当 MN 或 MP 肥配施时, 则会明显提高土壤微生物固存磷的能力, 提高土壤中磷储量, 降低了磷活性。

不同施肥年限表层土壤的 C : P 基本上均显著高于表下层土壤, 这也从侧面说明了表层土壤对磷的固存能力要明显高于表下层土壤。不同土层间 C : P

的差异显著, 可能是因为土壤磷含量相对较为稳定, 其比值主要受土壤碳含量影响, 而表层土壤与表下层土壤碳含量具有较大差异, 因而不同土层 C : P 具有较大的差异性^[6]。本文研究发现施肥年限对表层和表下层土壤微生物活动和磷素固存具有重要影响。但表层和表下层土壤 C : P 在不同施肥年限对同一施肥处理的不同响应, 可能因为作物种类不同或气候条件变化造成的。

3.2.3 施肥对土壤 N : P 的影响 土壤 N : P 低, 土壤磷活性高^[37]。本文研究发现, 各施肥年限 M 和 MN 处理表层土壤 N : P 均显著高于其 CK 处理; 2012 年、2013 年 N 和 NP 处理表层土壤的 N : P 则显著低于其 CK 处理; 而表下层土壤只有 2013 年的 M, MN 和 MP 处理显著高于其 CK 处理。表明单施 M 肥或 MN 肥配施时, 土壤中的磷活性降低; 单施 N 肥或 NP 肥配施时, 土壤中的磷具有较高活性。磷作为作物生长和微生物活动不可缺少的元素, 其活性的提高是有利于作物生长, 且会提高微生物活性从而改善土壤品质。各年限不同土层之间只有在单施 N 或 M 肥或 MN 肥配施时, 表层土壤的 N : P 均显著高于其表下层土壤, 说明在单施 N 或 M 肥或 MN 肥配施时表层与表下层土壤氮和磷状况并不一致。而不同施肥年限对表层土壤 N : P 并无影响, 这可能是因为施肥年限对表层土壤氮、磷含量均无显著影响, 因此表层土壤的 N : P 变化不大。不同于表层土壤, 表下层土壤 N : P 在 NP 或 MN 肥配施时受施肥年限影响显著, 但二者对表下层土壤氮、磷状况影响并不一致, NP 处理主要影响土壤磷的状态, MN 处理则主要影响土壤氮。因此, NP 肥配施主要提高了土壤磷活性, MN 肥配施会相对降低磷活性。

4 结论

施肥对农地表层土壤碳、氮、磷含量的影响作用要明显大于表下层土壤, 相对于磷含量而言, 施肥年限主要影响表层土壤碳、氮含量。农地施肥对土壤 C : N 有一定影响, 但主要影响的是土壤 C : P 和 N : P; 施肥会引起表层和表下层土壤 C : N : P 差异变大, 尤其是土壤 C : P; 施肥年限对土壤的 C : N : P 有明显影响, 且对表下层土壤的影响更为显著。在该地区农地进行 MP 肥配施有利于土壤对碳、氮、磷的积累, 增加土壤碳、氮、磷库; NP 肥配施有利于土壤中活性磷的提高, 为作物生长提供必须的磷元素。本文只是从土壤养分的角度考虑施肥方式对土壤碳、氮、磷积累和土壤质量的影响, 而农地主要作用是粮食生产, 其作物产量和质量是考虑选择施肥方式的主要因

子。综合考虑施肥对作物生长和土壤生态环境的影响,从而选择适合该地区的施肥方式。

参考文献:

- [1] Gao Y, He N, Yu G, et al. Long-term effects of different land use types on C, N, and P stoichiometry and storage in subtropical ecosystems: A case study in China[J]. *Ecological Engineering*, 2014,67:171-181.
- [2] 王绍强,于贵瑞.生态系统碳氮磷元素的生态化学计量学特征[J].*生态学报*,2008,28(8):3937-3947.
- [3] 刘蓉,张卫国,江小雷,等.垂穗披碱草群落退化演替的植被特性及其与土壤性状的相关性研究[J].*草业科学*,2010,27(10):96-103.
- [4] Sardans J, Rivas-Ubach A, Penuelas J. Factors affecting nutrient concentration and stoichiometry of forest trees in Catalonia (NE Spain)[J]. *Forest Ecology and Management*, 2011,262(11):2024-2034.
- [5] Tian H, Chen G, Zhang C, et al. Pattern and variation of C:N:P ratios in China's soils: a synthesis of observational data[J]. *Biogeochemistry*, 2010, 98(1/3): 139-151.
- [6] 朱秋莲,邢肖毅,张宏,等.黄土丘陵沟壑区不同植被区土壤生态化学计量特征[J].*生态学报*,2013,33(15):4674-4682.
- [7] 魏艳宏,袁志发,郭满才.黄土高原沟壑区旱地施肥水平对小麦产量影响的趋势面分析[J].*水土保持通报*,2014,34(1):203-206.
- [8] 郝明德,张俊兴,胡克昌.高原沟壑区农田生态系统中的肥料投入[J].*水土保持通报*,1995,15(6):16-21.
- [9] Guo S L, Dang T H, Hao M D. Phosphorus changes and sorption characteristics in a calcareous soil under long-term fertilization[J]. *Pedosphere*, 2008, 18(2): 248-256.
- [10] 张少民,郝明德,柳燕兰.黄土区长期施用磷肥对冬小麦产量、吸氮特性及土壤肥力的影响[J].*西北农林科技大学学报:自然科学版*,2007,35(7):159-163.
- [11] 俄胜哲,杨志奇,罗照霞,等.长期施肥对黄土高原黄绵土区小麦产量及土壤养分的影响[J].*麦类作物学报*,2016,36(1):104-110.
- [12] 来璐,郝明德,彭令发,等.黄土区旱地苜蓿连作条件下施肥对土壤磷素的影响[J].*西北植物学报*,2003,23(8):1471-1474.
- [13] 高会议,郭胜利,刘文兆,等.施肥措施对黄土旱塬区小麦产量和土壤有机碳积累的影响[J].*植物营养与肥料学报*,2009,15(6):1333-1338.
- [14] 胡诚,乔艳,李双来,等.长期不同施肥方式下土壤有机碳的垂直分布及碳储量[J].*中国生态农业学报*,2010,18(4):689-692.
- [15] 胡诚.长期施用生物有机肥对土壤肥力及微生物生物量碳的影响[J].*中国生态农业学报*,2007,15(3):48-51.
- [16] 高亚军,朱培立,黄东迈,等.稻麦轮作条件下长期不同土壤管理对有机质和全氮的影响[J].*土壤与环境*,2000,9(1):27-30.
- [17] Menendez S, Lopez-Bellido R J., Benitez-Vega J. et al. Long-term effect of tillage, crop rotation and N fertilization to wheat on gaseous emissions under rainfed Mediterranean conditions [J]. *European Journal of Agronomy*, 2008,28(4):559-569.
- [18] Yang X, Ren W, Sun B, et al. Effects of contrasting soil management regimes on total and labile soil organic carbon fractions in a loess soil in China[J]. *Geoderma*, 2012,177:49-56.
- [19] Rudrappa L, Purakayastha T, Singh D, et al. Long-term manuring and fertilization effects on soil organic carbon pools in a Typic Haplustept of semi-arid subtropical India[J]. *Soil and Tillage Research*, 2006,88(1):180-192.
- [20] 宇万太,姜子绍,马强,等.施用有机肥对土壤肥力的影响[J].*植物营养与肥料学报*,2009,15(5):1057-1064.
- [21] 赵广帅,李发东,李运生,等.长期施肥对土壤有机质积累的影响[J].*生态环境学报*,2012,21(5):840-847.
- [22] Russell A E, Laird D, Parkin T B, et al. Impact of nitrogen fertilization and cropping system on carbon sequestration in Midwestern Mollisols[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2005,69(2):413-422.
- [23] Lou Y, Wang J, Liang W. Impacts of 22-year organic and inorganic N managements on soil organic C fractions in a maize field, northeast China[J]. *Catena*, 2011,87(3):386-390.
- [24] Majumder B, Mandal B, Bandyopadhyay P K. Soil organic carbon pools and productivity in relation to nutrient management in a 20-year-old rice-berseem agroecosystem[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2007,44(3):451-461.
- [25] 鲍士旦.土壤农化分析[M].3版.北京:中国农业出版社,2000.
- [26] Hooda P, Truesdale V, Edwards A, et al. Manuring and fertilization effects on phosphorus accumulation in soils and potential environmental implications[J]. *Advances in Environmental Research*, 2001,5(1):13-21.
- [27] Su Y Z, Wang F, Suo D R, et al. Long-term effect of fertilizer and manure application on soil-carbon sequestration and soil fertility under the wheat-wheat-maize cropping system in northwest China [J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2006,75(1/3):285-295.
- [28] 宋春,韩晓增.长期施肥条件下土壤磷素的研究进展[J].*土壤*,2009,41(1):21-26.

- 2012,355(1/2):407-416.
- [19] Malhi Y, Baldocchi D D, Jarvis P G. The carbon balance of tropical, temperate and boreal forests [J]. *Plant Cell & Environment*, 2010,22(6):715-740.
- [20] Loranger G, Ponge J F, Imbert D, et al. Leaf decomposition in two semi evergreen tropical forests: influence of litter quality [J]. *Biology and Fertility Soil*, 2002,35(4):247-252.
- [21] 牛晓燕,刘志强,赵晶晶,等.大兴安岭森林火烧后不同演替阶段土壤细菌多样性动态[J].*微生物学通报*, 2017,44(8):1825-1833.
- [22] Liu C P, Sheu B H. Dissolved organic carbon in precipitation, throughfall, stemflow, soil solution, and stream water at the Guandaushi subtropical forest in Taiwan[J]. *Forest Ecology and Management*, 2003, 172(2/3):315-325.
- [23] 舒洋,周梅,赵鹏武,等.兴安落叶松人工林土壤碳密度分布特征研究[J].*西北农林科技大学学报:自然科学版*, 2017,45(6):44-52.
- [24] 范跃新,杨玉盛,杨智杰,等.中亚热带常绿阔叶林不同演替阶段土壤活性有机碳含量及季节动态[J].*生态学报*, 2013,33(18):5751-5759.
- [25] 张晓勉,高智慧,高洪娣,等.基岩质海岸防护林主要林分类型土壤抗冲性研究[J].*浙江林业科技*, 2012,32(5):1-4.
- [26] 苟小林,吴福忠,杨万勤,等.季节性冻融格局变化对高山森林土壤 DOC 淋洗的影响[J].*水土保持学报*, 2013,27(6):205-210.
- [27] Tipping E, Marker A F H, Butterwick C, et al. Organic carbon in the Humber rivers [J]. *Science of the Total Environment*, 1997,194:345-355.
- [28] 赵鹏武.大兴安岭兴安落叶松林凋落物动态与养分释放规律研究[D].呼和浩特:内蒙古农业大学,2009.
- [29] Zhang C, Jamieson R C, Meng F R, et al. Projecting in-stream dissolved organic carbon and total mercury concentrations in small watersheds following forest growth and clearcutting[J]. *Water, Air, & Soil Pollution*, 2016,227(9),DOI:10.1007/s11270-016-3017-6.
- [30] Michalzik B, Matzner E. Dynamics of dissolved organic nitrogen and carbon in a Central European Norway spruce ecosystem [J]. *European Journal of Soil Science*, 2010,50(4):579-590.
- [31] Kalbitz K, Solinger S, Park J H. Controls on the dynamics of dissolved organic matter in soils: A review [J]. *Soil Science*, 2000,165(4):277-304.
- [32] 郭剑芬,杨玉盛,林鹏,等.木荷与杉木人工林枯枝落叶层溶解有机碳浓度及季节动态[J].*厦门大学学报:自然科学版*, 2006,45(2):289-292.
- [33] 刘帅,陈玥希,孙辉,等.西南亚高山—高山海拔梯度上森林土壤水溶性有机碳时间动态[J].*西北林学院学报*, 2015,30(1):33-38.
- [34] 张金波,宋长春,杨文燕.小叶章湿地表土水溶性有机碳季节动态变化及影响因素分析[J].*环境科学学报*, 2005,25(10):1397-1402.
- [35] Nambu K, Yonebayashi K. Role of dissolved organic matter in translocation of nutrient cations from organic layer materials in coniferous and broad leaf forests [J]. *Soil Science and Plant Nutrition*, 1999,45(2):307-319.

(上接第 45 页)

- [29] Manna M, Swarup A, Wanjari R, et al. Long-term effect of fertilizer and manure application on soil organic carbon storage, soil quality and yield sustainability under sub-humid and semi-arid tropical India[J]. *Field Crops Research*, 2005, 93(2):264-280.
- [30] 宁川川,王建武,蔡昆争.有机肥对土壤肥力和土壤环境质量的影响研究进展[J].*生态环境学报*, 2016,25(1):175-181.
- [31] Cleveland C C, Liptzin D. C : N : P stoichiometry in soil: is there a “Redfield ratio” for the microbial biomass[J]. *Biogeochemistry*, 2007,85(3):235-252.
- [32] Chapin III F S, Matson P A, Mooney H A. *Principles of Terrestrial Ecosystem Ecology* [M]. New York, USA: Springer-Verlag, 2002.
- [33] Sterner R W, Elser J J. *Ecological Stoichiometry: the Biology of Elements from Molecules to the Biosphere* [M]. Princeton, USA: Princeton University Press, 2002.
- [34] Méndez M, Karlsson P S. Nutrient stoichiometry in *Pinus vulgaris*: Nutrient availability, plant size, and reproductive status[J]. *Ecology*, 2005,86(4):982-991.
- [35] 彭佩钦,张文菊,童成立,等.洞庭湖湿地土壤碳、氮、磷及其与土壤物理性状的关系[J].*应用生态学报*, 2005, 16(10):1872-1878.
- [36] Stevenson F J, Michael A C. *Cycles of Soils: Carbon, Nitrogen, Phosphorus, Sulfur, Micronutrients* [M]. Hoboken, USA: John Wiley & Sons, 1999.
- [37] Jensen H. *Nonsymbiotic Nitrogen Fixation* [M] // Bartholomew W V, Clark F E. *Soil Nitrogen*. Madison: American Society of Agronomy. Wisconsin, USA, 1965.