长期退耕对红壤团聚体碳氮磷生态化学计量特征的影响

宋莉群[1,2] 王义东[1*] 李冬初[3] 张会民[3] 娄翼来[4] 窦渤凯[1,2] 尚云涛[1] 王中良[1,2]
([1]天津师范大学天津市水资源与水环境重点实验室, 天津 300387; [2]天津师范大学地理与环境科学学院, 天津 300387; [3]中国农业科学院农业资源与农业区划研究所, 北京 100081; [4]中国农业科学院农业环境与可持续发展研究所, 北京 100081)

摘 要 目前,长期退耕恢复如何影响红壤团聚体组成及其碳氮磷生态化学计量特征还不十分清楚。本研究基于湖南红壤试验站连续27年的长期定位试验,选取常规施肥耕作和退耕恢复两个处理,采集0~15 cm耕层土样,利用湿筛法探讨了土壤团聚体粒级组成及其碳氮磷含量与生态化学计量特征对长期退耕的响应规律。结果显示:相比于常规施肥耕作方式,退耕恢复处理下:①土壤水稳性大团聚体(>0.25 mm)总量显著增加,微团聚体(0.053~0.25 mm)和矿质颗粒(<0.053 mm)含量显著降低;②土壤有机碳和全氮含量显著增加,全磷含量显著降低,其中有机碳含量在各个粒级团聚体中均显著增加,全氮含量则在大团聚体(>2和0.25~2 mm)与微团聚体(0.053~0.25 mm)中显著增加,而全磷含量在各粒级团聚体中均显著降低。另外,0.25~2 mm粒级大团聚体对土壤碳氮磷养分贡献率最高;③土壤C∶N、C∶P和N∶P显著升高,但C∶N在各粒级团聚体中表现较为稳定,而C∶P和N∶P变异性较大,在各粒级土壤团聚体中均有显著升高。综上,退耕恢复增强了耕层土壤的团聚作用,使碳、氮、磷更集中赋存于大团聚体中,对土壤结构、团聚体质量有改善作用,但对于磷素限制作用的增强值得今后注意。

关键词 长期退耕; 土壤团聚体; 碳氮磷; 生态化学计量学; 红壤

Long-term effects of natural restoration on C∶N∶P ecological stoichiometry in aggregates of red soil. SONG Li-qun[1,2], WANG Yi-dong[1*], LI Dong-chu[3], ZHANG Hui-min[3], LOU Yi-lai[4], DOU Bo-kai[1,2], SHANG Yun-tao[1], WANG Zhong-liang[1,2] ([1]*Tianjin Key Laboratory of Water Resources and Environment, Tianjin Normal University, Tianjin* 300387, *China*; [2]*School of Geographic and Environmental Sciences, Tianjin Normal University, Tianjin* 300387, *China*; [3]*Institute of Agricultural Resources and Regional Planning, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing* 100081, *China*; [4]*Institute of Environment and Sustainable Development in Agriculture, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing* 100081, *China*).

Abstract: It is not clear how long-term natural restoration affects soil aggregate distribution and C∶N∶P ecological stoichiometric characteristics in red soil. Soil samples (0-15 cm depth) were taken from two treatments, conventional farming (CF) and natural restoration (NR), in a 27-year field experiment in Hunan Red Soil Experimental Station. The aim of this study is to investigate the response of soil aggregate distribution and the contents and stoichiometric ratios of soil organic C (SOC), total N (TN) and total P (TP) to long-term natural restoration. Compared with CF, (1) The total soil water-stable macroaggregates (>0.25 mm) in NR significantly increased, and the proportion of microaggregates (0.053-0.25 mm) and mineral particles (<0.053 mm) significantly decreased; (2) The contents of SOC and TN in bulk soil of NR significantly increased. While the SOC content significantly increased in each aggregate size class, TN content in macroaggregates (>2 and 0.25-2 mm) and microaggregates (0.053-0.25 mm)

国家自然科学基金项目(31300381)和天津市应用基础与前沿技术研究计划项目(15JCYBJC49200)资助。
收稿日期: 2018-09-14 接受日期: 2019-02-20
*通讯作者 E-mail: wangyidong@tjnu.edu.cn

significantly increased. In contrast, TP content significantly decreased in bulk soil and each aggregate-size fraction. The 0.25-2 mm aggregate size class contributed most of nutrients in the bulk soil. (3) The ratios of C∶N, C∶P and N∶P in bulk soil of NR significantly increased. The C∶N ratio of the four aggregates remained constant, while C∶P and N∶P showed greater variability and significantly increased in each aggregate size class. In conclusion, long-term natural restoration enhances soil aggregation effect, which results in more concentrated C, N and P in macroaggregates. While natural restoration can improve soil structure and aggregate quality, attention should be paid to the exacerbated phosphorus limitation in future.

Key words: long-term natural restoration; soil aggregate; carbon, nitrogen and phosphorus; ecological stoichiometry; red soil.

土壤团聚体是土壤结构的基本单元,同时也是土壤养分存储的主要载体(王清奎等,2005),其形成在一定程度上有赖于有机胶结剂的作用(刘中良等,2011)。Tisdall 等(1982)根据促使团聚体形成的有机胶结剂类型,将团聚体分为大团聚体(>0.25 mm)和微团聚体(<0.25 mm);Six 等(1998)通过湿筛法又将其进一步细化分为 4 种粒级水稳性团聚体:> 2 mm 粒级大团聚体、0.25~2 mm 粒级大团聚体、微团聚体(0.053 ~ 0.25 mm)和矿质颗粒(<0.053 mm)。不同粒级团聚体对土壤养分元素的保持、供应及转化能力有所不同,其组成比例同时影响着土壤肥力水平的高低(王清奎等,2005)。Udom 等(2015)、刘中良等(2011)研究发现,土壤碳、氮、磷养分的累积依赖于团聚体粒级组成比例,其中大团聚体对土壤养分的固持有重要作用。此外,不同粒径团聚体中碳、氮、磷的存在形态和稳定性也各不相同(郭万伟等,2009;胡宁等,2015;孙娇等,2016),且随着土壤环境的变化有不同的变化趋势(Devine *et al.*,2014;Gelaw *et al.*,2015)。因此,研究各粒级团聚体中碳、氮、磷含量的变化特征对揭示土壤养分在不同条件下的循环与转化机制具有重要意义。

生态化学计量学是将生态学与化学计量学结合在一起,从元素比例的角度出发来研究生态系统能量平衡以及生态过程中化学元素的平衡关系(Elser *et al.*,2000;曾全超等,2016),它主要强调碳、氮、磷 3 种主要组成元素的关系(李玮等,2015)。利用生态化学计量学手段分析碳、氮、磷在土壤团聚体中的循环特征及其相互作用关系对阐明土壤内部碳氮磷养分的限制趋势与平衡机制有重要意义。目前,国内外学者对土壤 C∶N∶P 已有部分研究,全球范围内土壤 C∶N∶P 在 186∶13∶1 到 287∶17∶1 之间波动(Cleveland *et al.*,2007;王传杰等,2018)。Tian 等(2010)发现,我国陆地土壤 C∶N∶P 约为 60∶5∶1,土壤表层(0~10 cm)有机质 C∶N∶P 约为 134∶9∶1。我国农田土壤 C∶N 的变化范围在 7~13 之间(许泉等,2006;王传杰等,2018)。此外,研究表明,气候(Tian *et al.*,2010)、植被类型(曾全超等,2016)、土壤微生物(Cleveland *et al.*,2007)以及耕作方式(Roldán *et al.*,2003)等因素都会对土壤 C∶N∶P特征产生不同程度的影响。但以上研究多关注于土壤碳氮磷养分的变化,对土壤团聚体 C∶N∶P特征却鲜有报道。

红壤是我国南方典型的农田土壤,而常规耕作中的肥料施用以及土壤翻耕等人为活动势必会引起土壤环境的变化,从而打破农田生态系统原有的碳氮磷养分平衡关系。近年来国家倡导在西南生态严重退化地区实施轮作休耕、退耕制度,当地土壤环境逐渐改变。而团聚体作为退耕撂荒地生态恢复的关键因子之一(戴全厚等,2007),已有部分学者对其开展研究:杨宁等(2016)在对紫色土的研究中发现,植被恢复可改变土壤结构,导致团聚体重新分配和大团聚体形成;刘晓利等(2009)对旱地红壤研究发现,团聚体有机碳和全氮含量随粒径增大而增加,但磷素含量在团聚体中分布较均匀;王传杰等(2018)对黑土的研究表明,退耕撂荒降低了土壤 C∶N,且显著增加了土壤 C∶P 和 N∶P。但退耕恢复对红壤团聚体碳氮磷生态化学计量特征的影响尚不清楚。因此,本研究基于长期定位试验,选取旱地红壤为研究对象,探讨退耕恢复对土壤团聚体粒级组成及其碳氮磷生态化学计量特征产生的影响,以期为农田红壤保护性利用提供理论基础。

1 研究地区与研究方法

1.1 研究区概况与试验设计

本文基于中国农业科学院湖南红壤长期定位试

验站(26°45′42″N,111°52′32″E)开展研究。该试验站地处亚热带季风气候区,年均温度 18.0 ℃,年均降雨量 1250 mm,水热资源丰富。供试土壤为旱地红壤,成土母质为第四纪红土。

该长期定位试验始于 1990 年,站内共设置 12 个试验处理,本研究选取其中两种处理:CF(conventional farming,即常规施肥耕作,种植制度为一年两熟的小麦-玉米轮作,N、P_2O_5、K_2O 年用量分别为 300、120、120 kg · hm^{-2})和 NR(natural restoration,即长期退耕恢复,样地退耕前为常规耕作的旱作农田,目前该样地植被以草本植物和低矮灌木为主)作为研究对象。

1.2 样品采集与分析

土壤样品采集于 2017 年 7 月,各试验处理小区均为 198 m^2的大样地,分别在所选取的两个试验处理小区内随机多点取 0~15 cm 耕层土样混匀,每个试验处理各取 3 次重复。将采集的样品带回实验室后,置于室温下风干,去除植物碎屑、根系和砾石等杂质后用于土壤团聚体的筛分。

本研究采用湿筛法(Wang *et al.*,2018)对团聚体进行粒级分组:取 4 份约 25 g 风干土样放置于孔径自上而下为 2、0.25、0.053 mm 的套筛的顶层筛上,将套筛置于水桶中加水浸润,通过土壤团聚体分析仪(XY-100 型,中国)的上下振动使样品震荡过筛,然后收集各级网筛上以及桶中的团聚体于铝盒中,共可筛分出 4 种粒级水稳性团聚体:>2 mm 粒级大团聚体、0.25~2 mm 粒级大团聚体、微团聚体(0.053~0.25 mm)和矿质颗粒(<0.053 mm),在 60 ℃下烘干,分别称重。全土以及各粒级团聚体中有机碳、全氮含量用元素分析仪(PerkinElmer 2400,美国)测定;全磷采用 $HClO_4$-H_2SO_4法消煮,钼锑抗比色法(鲍士旦,2000)测定。

1.3 数据处理

各粒级土壤团聚体中养分对全土养分含量的贡献率通过式(1)计算(邱莉萍等,2006):

某粒级团聚体养分贡献率 = (该级团聚体中养分含量×该级团聚体含量(%))/全土中养分含量×100% (1)

实验所得数据用 Excel 2016 和 SPSS 24.0 进行统计分析,C∶N、C∶P、N∶P 均采用摩尔比。比较两处理间的差异显著性采用独立样本 *T* 检验;比较不同团聚体粒级间的差异显著性采用单因素方差分析(one-way ANOVA),多重比较选用 Duncan 检验(P<0.05)。利用 OriginPro 2018 软件作图。

2 结果与分析

2.1 红壤团聚体粒级组成特征

与常规施肥耕作处理(CF)相比,长期退耕恢复处理(NR)微团聚体(0.053~0.25 mm)和矿质颗粒(<0.053 mm)的含量在全土中所占比例分别减少 29.6%、35.2%(P<0.05),而各粒级大团聚体(>2 和 0.25~2 mm)的占比在两处理间没有表现出显著差异(图 1)。从各粒级团聚体的整体组成情况来看,长期退耕恢复没有对红壤团聚体粒级组成特征产生影响,CF 处理和 NR 处理均表现出大团聚体(>0.25 和 0.25~2 mm)在全土中所占比例显著高于微团聚体(0.053~0.25 mm)和矿质颗粒(<0.053 mm)的比例,其中 0.25~2 mm 粒级团聚体占比最多(CF:45.4%,NR:50.9%)(图 1)。

2.2 红壤团聚体有机碳、全氮和全磷含量与分布特征

2.2.1 不同粒级土壤团聚体中有机碳、全氮和全磷含量与分布

长期退耕恢复使土壤碳、氮、磷含量均发生了显著变化,NR 处理全土的有机碳和全氮含量分别比 CF 处理高 74.1%、37.5%,而全磷含量比 CF 处理低 22.9%(P<0.05)(图 2)。各粒级土壤团聚体中碳、氮、磷含量的变化也不尽相同(图 2)。

长期退耕恢复处理各粒级土壤团聚体中有机碳含量相对较高,按粒径由大到小顺序,NR 处理的团聚体有机碳含量比CF处理分别高70.1%、51.4%、

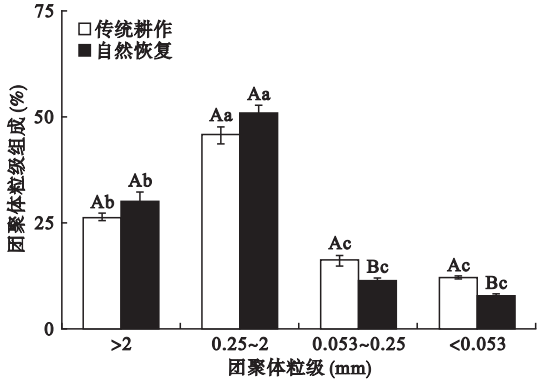


图 1 不同处理的红壤团聚体粒级组成

Fig.1 Distribution of the red soil aggregates under different treatments

不同大写字母表示同一团聚体粒级不同处理间差异显著(P<0.05),不同小写字母表示同一处理不同团聚体粒级间差异显著(P<0.05),下同。

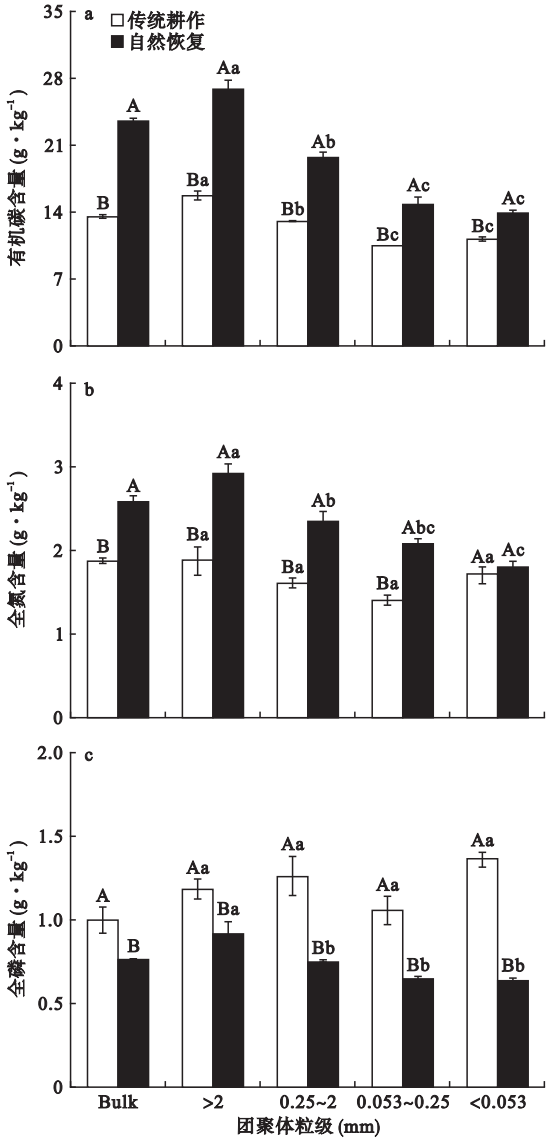


图2 不同处理红壤团聚体中有机碳、全氮和全磷含量

Fig.2 Contents of organic carbon, total nitrogen and total phosphorus in the red soil aggregates under different treatments

41.3%和24.5%(P<0.05)(图2a)。然而,长期退耕恢复下土壤团聚体有机碳含量的整体分布规律与常规施肥耕作处理保持一致,即大团聚体(>2和0.25~2 mm)中有机碳含量均高于微团聚体(0.053~0.25 mm)和矿质颗粒(<0.053 mm)中的含量,且在以上4个团聚体粒级中,>2 mm粒级大团聚体有机碳含量最高(CF:15.7 g·kg^{-1},NR:26.8 g·kg^{-1})(图2a)。

CF和NR两处理中矿质颗粒(<0.053 mm)的全氮含量相近(CF:1.7 g·kg^{-1},NR:1.8 g·kg^{-1}),表明长期退耕恢复对该粒级团聚体全氮含量没有显著影响(图2b)。而其他3个粒级土壤团聚体全氮含量的变化情况受长期退耕恢复影响较大,相比于CF处理,NR处理中大团聚体(>2和0.25~2 mm)和微团聚体(0.053~0.25 mm)的全氮含量按粒径由大到小依次高出55.4%、45.8%、47.6%(P<0.05)(图2b)。CF处理中各粒级团聚体间的全氮含量无显著差异,而NR处理中,>2 mm粒级大团聚体的全氮含量显著高于其他粒级(P<0.05)(图2b)。

与有机碳和全氮含量的变化情况不同,全磷在长期退耕恢复(NR)处理各粒级团聚体中的含量均比常规施肥耕作(CF)处理同粒级团聚体中的含量低,按粒径由大到小分别低22.2%、40.5%、38.2%和53.0%(P<0.05)(图2c)。对于CF处理,各粒级团聚体全磷含量无显著差异,平均1.21 g·kg^{-1}。但对于NR处理,>2 mm粒级大团聚体的全磷含量(0.92 g·kg^{-1})显著高于其他粒级(P<0.05),而其他粒级团聚体间全磷含量无显著差异(图2c)。

2.2.2 各粒级土壤团聚体对土壤有机碳、全氮和全磷的贡献率 相比于常规施肥耕作处理(CF),长期退耕恢复(NR)显著降低了微团聚体(0.053~0.25 mm)对全土有机碳的贡献率以及矿质颗粒(<0.053 mm)对全土有机碳、全碳和全磷的贡献率(P<0.05)(表1)。整体来看,与常规施肥耕作处理(CF)基本一致,长期退耕恢复(NR)土壤有机碳、全氮和全磷大部分(77%以上)赋存于大团聚体(>2和0.25~2 mm)中,其中以0.25~2 mm粒级团聚体贡献主要作用(其对全土养分贡献率为42.7%~49.7%)(表1)。

2.3 红壤团聚体碳、氮、磷生态化学计量特征

长期退耕恢复处理对土壤团聚体中碳氮磷养分含量产生了不同程度的影响(图2),这必然会影响各粒级土壤团聚体C∶N、C∶P以及N∶P特征。

表1 各粒级红壤团聚体对土壤养分含量的贡献率(%)

Table 1 The contribution rates of aggregates to soil nutrient content (%)

项目	处理	团聚体养分贡献率(%)			
		>2 mm	0.25~2 mm	0.053~0.25 mm	<0.053 mm
有机碳	CF	30.7 a	43.8 a	12.5 a	10.1 a
	NR	34.0 a	42.7 a	7.2 b	4.7 b
全氮	CF	26.2 a	38.8 a	12.1 a	11.0 a
	NR	34.1 a	46.3 a	9.2 a	5.5 b
全磷	CF	31.5 a	57.6 a	17.4 a	16.7 a
	NR	35.5 a	49.7 a	9.6 a	6.5 b

表中数值为平均值±标准误;同一列中不同字母表示不同处理间差异显著(P<0.05)。

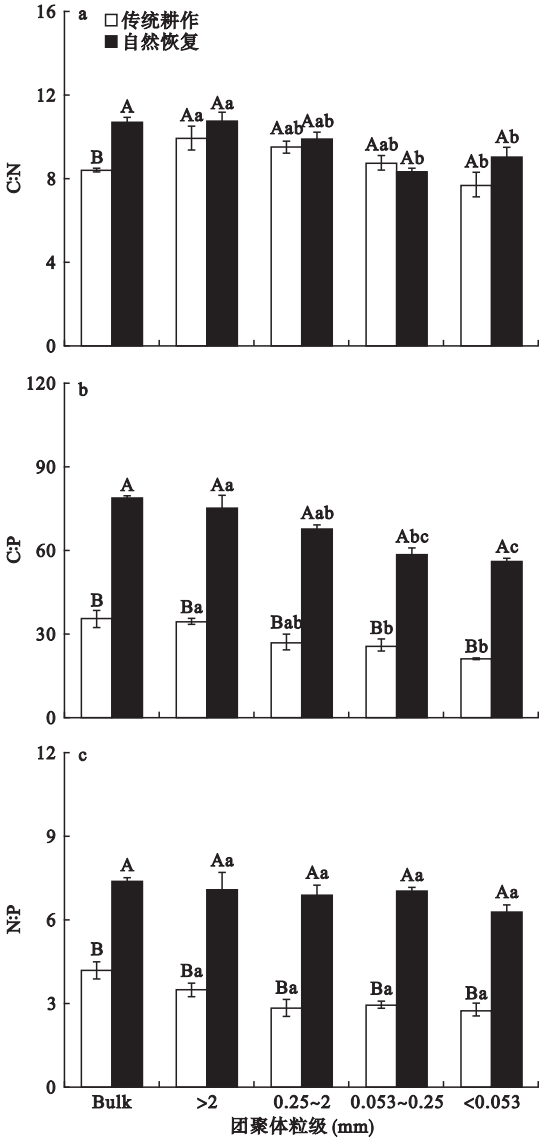


图 3 不同处理红壤团聚体有机碳、全氮、全磷的生态化学计量特征

Fig.3 Stoichiometric characteristics of organic carbon, total nitrogen and total phosphorus in the red soil aggregates under different treatments

如图 3 所示,在全土中,与常规施肥耕作处理(CF)相比,长期退耕恢复处理(NR)C∶N、C∶P 和 N∶P 的值相对较高(P<0.05)。两处理各粒级土壤团聚体 C∶N、C∶P 和 N∶P 变化范围分别为 7.7~10.8、21.2~75.7、2.8~7.1,变异系数依次为 10.5%、46.0%、41.7%,表明土壤团聚体 C∶N 相比于C∶P、N∶P 更为稳定。

从团聚体粒径角度看,C∶N 在 CF 和 NR 两处理的同一粒级团聚体中差异不显著(图 3a)。而 C∶P和 N∶P 在 4 个粒级团聚体中均表现出 NR 处理显著高于 CF 处理(P<0.05),其中 NR 处理团聚体中的 C∶P 值平均比 CF 处理高出 1.4 倍,N∶P 高出 1.3 倍(图 3b,c)。常规施肥耕作(CF)和长期退耕恢复(NR)两处理团聚体中的 C∶N 均表现为>2 mm 粒级大团聚体的值显著高于矿质颗粒(<0.053 mm),而其他粒级间差异不显著(图 3a)。与之相似,CF 和 NR 两处理中>2 mm 粒级大团聚体的 C∶P 均显著高于微团聚体(0.053~0.25 mm)和矿质颗粒(<0.053 mm)(图 3b)。而 N∶P 在常规施肥耕作(CF)和长期退耕恢复(NR)处理团聚体中的平均值分别为 3.0 和 6.8,且在同一处理各粒级团聚体间均无显著差异(图 3c),变异系数分别为 10.7%和 5.6%。

3 讨 论

3.1 长期退耕对红壤团聚体粒级组成的影响

不同粒级土壤团聚体在营养元素的保持、供应及转化能力等方面作用不同,因此适宜的土壤团聚体粒级组成比例是土壤肥力的物质基础(陈恩凤等,2001;王清奎等,2005)。已有研究表明,土壤有机质和耕作强度会直接或间接影响团聚体的形成与稳定(Six *et al.*,1998;Zhang *et al.*,2001)。本研究结果显示,试验样地经连续 27 年的长期退耕恢复,其土壤团聚体粒级组成特征仍与常规施肥耕作土壤保持一致,即大团聚体(>2 和 0.25~2 mm)组分比例达 81%,显著高于其他粒级团聚体(图 1)。这样的团聚体粒级组成特征与陈晓芬等(2013)、柳开楼等(2018)分别用湿筛法以及干筛与湿筛结合的方法对红壤筛分所得结果相似,表明供试土壤结构性良好(崔江辉等,2018)。与常规施肥耕作相比,长期退耕恢复使微团聚体(0.053~0.25 mm)和矿质颗粒(<0.053 mm)的含量降低了约 1/3(图 1),这一方面是因长期退耕恢复地避免了人为耕作对表层土壤的扰动,提高了大团聚体的稳定性(武均等,2014),减少了因大团聚体的物理机械破碎所释放的小粒级团聚体。另一方面是由于长期退耕恢复后,土壤团聚体中有机碳含量显著增加(图 2a),土壤胶结作用增强,促使小粒级团聚体通过有机质的胶结作用形成大团聚体(Zhang *et al.*,1996;王清奎等,2005),从而降低其自身比例。相比之下,长期退耕恢复显著增加了大团聚体(>0.25 mm)的总量,但对其中所包含的各粒级团聚体(>2 和 0.25~2 mm)含量的提升作用并不显著(图 1),这与刘恩科等(2010)研究结果相似。以上结果表明:微团聚体(0.053~0.25 mm)

和矿质颗粒(<0.053 mm)的含量变化对长期退耕恢复所引起的土壤环境变化的响应比各粒级大团聚体(>2和0.25~2 mm)更加敏感。

3.2 长期退耕对红壤团聚体有机碳、全氮和全磷含量的影响

土壤团聚体与有机碳有着密不可分的相互依存关系(刘中良等,2011),耕作措施、施肥制度以及植被演替等都会对团聚体有机碳含量产生影响(冷延慧等,2008;陈晓芬等,2013;武均等,2015;孙娇等,2016)。本研究中,长期退耕恢复处理使全土以及各粒级团聚体有机碳含量均有显著增加(图2a)。土壤有机碳含量的多少是外源输入累积量与矿化分解损失量之间平衡作用的结果。相比于常规施肥耕作处理的作物种植与收获,长期退耕恢复不仅可以增加地上部分植物残体的归还量,而且地下植物根系也更为发达(戴全厚等,2007),对土壤有机碳输入量的累积有积极作用。同时,退耕避免了常规耕作对团聚体的破坏,增强了团聚体对所包裹的颗粒态有机碳的物理保护,加之较少的耕作扰动也会通过改变温度和水分条件等土壤状况降低微生物对凋落物的分解速率(刘中良等,2011),进而减缓有机碳的消耗。另有前人研究表明(霍琳等,2008;崔江辉等,2018):减施化肥也会通过降低微生物对植物残体的腐解速率而增加土壤有机碳含量。此外,常规施肥耕作和退耕恢复两组处理的有机碳在各粒级团聚体中的分布特征均表现为:大团聚体(>2和0.25~2 mm)中的含量高于微团聚体(0.053~0.25 mm)和矿质颗粒(<0.053 mm)(图2a)。这与大团聚体的形成过程有关:其一,根据Tisdall和Oades(1982)提出的团聚体等级发育模型,有机质是微团聚体向大团聚体逐级团聚过程中的主要胶结物质;其二,在团聚过程中,大团聚体内会裹挟处于分解状态的植物根系以及菌丝等颗粒态有机质(刘中良等,2011),从而提升其有机碳含量。

土壤碳氮之间存在着显著的耦合关系(周正虎等,2015),土壤氮素作为重要的养分元素,主要来源于植物残体分解与合成所形成的有机质,其动态变化与有机碳常具有一致性(陈晓芬等,2013;李玮等,2015)。本研究中,长期退耕恢复土壤全氮含量高于常规施肥耕作处理(图2b),这与前人研究结果一致(艾娜等,2008;王传杰等,2018)。尽管常规耕作土壤通过施用化肥而有更多外源氮的输入,但其中大部分会直接被植物吸收,或通过硝化与反硝化作用以及淋溶等途径损失(Wang *et al.*,2018),而退耕恢复土壤有机氮则通过有机质含量的提升得以增加,使土壤氮素累积。这一土壤全氮含量的增加则具体表现在大团聚体(>2和0.25~2 mm)和微团聚体(0.053~0.25 mm)中,而矿质颗粒(<0.053 mm)全氮含量却与常规耕作处理同粒级中相对较高的全氮含量相近,并不受此影响(图2b)。邱莉萍等(2006)研究认为,矿质颗粒粒径较小,比表面积大,吸附能力强,可吸附更多的有机质而使有机氮得以积累,并且土壤颗粒表面带有负电荷会使较小粒级团聚体更易吸附NH_4^+-N(曹良元等,2009)。同时,矿质颗粒稳定性较强且周转较慢,与之结合的有机质成分也更稳定,不易被矿化分解(刘中良等,2011),因而有较强的吸附和保存氮素的能力。此外,相比于氮素在常规耕作土壤各粒级团聚体间的较均匀分布,退耕恢复处理中,>2 mm粒级大团聚体的全氮含量显著高于其他粒级(图2b),表明长期退耕恢复促使土壤氮素向>2 mm粒级大团聚体中富集。

土壤磷素是植物生长所必需的营养元素之一。全磷作为土壤磷素养分的重要指标,代表着土壤磷库的大小,其盈亏不仅关系到农业生产而且具有一定程度的环境风险(樊红柱等,2018)。本研究中,相比常规施肥耕作,长期退耕恢复处理的全土及各粒级团聚体的全磷含量均显著降低(图2c)。这与土壤有机碳和全氮含量的变化特征不同(图2a,b),表明长期退耕恢复可提升土壤的固磷能力,同时降低土壤磷素的流失风险(王经纬等,2017)。其原因可能为:一方面,由于磷元素在自然条件下主要来源于土壤母质且不参与大气循环(王传杰等,2018),且在农业生产中磷肥的当季利用率较低(张福锁等,2008),常规施肥处理的土壤全磷含量随着长期含磷化肥的投入而得以累积,而退耕恢复土壤由于长期没有外源磷肥的输入,所以随着土壤磷素的自然消耗而导致全土及团聚体中全磷含量水平较低。另一方面,虽然常规耕作能够促进有机质矿化,使部分有机磷通过转化为易于植物吸收利用的无机磷而损失(赵少华等,2004),但有机磷在土壤中的迁移与转化过程较为缓慢(王经纬等,2017),且本研究中常规耕作和退耕恢复两处理土壤有机磷含量分别仅占全磷含量的19.5%和27.2%,其含量的波动对全磷含量的变化影响并不显著。另外,与氮素在各粒级团聚体间的分布规律相似,常规耕作土壤各粒

级团聚体间的全磷含量无显著差异,而退耕恢复土壤中>2 mm 粒级大团聚体对全磷则有显著的富集作用(图 2c)。郭万伟等(2009)的研究也有相似结论,这可能与退耕恢复改变了该粒级团聚体中黏粒以及游离氧化铁铝的含量有关。

团聚体养分贡献率能客观表征土壤养分含量在各粒级团聚体中的分配情况。尽管在本研究中,长期退耕恢复土壤>2 mm 粒级大团聚体对有机碳、全氮以及全磷含量均表现出显著的富集作用(图 2),对土壤养分有较强的赋存能力,但实际土壤碳氮磷养分在各粒级团聚体间的分配则以 0.25~2 mm 粒级大团聚体占绝对优势(表 1)。这与陈晓芬等(2013)研究结果一致,说明团聚体含量最终决定着土壤养分在各粒级团聚体中的分配。因此,在实际的土壤养分管理中,应加强对有较高养分赋存能力的大团聚体的保护,改善土壤结构,以此提升土壤养分含量。

3.3 长期退耕对红壤团聚体碳氮磷生态化学计量特征的影响

土壤 C∶N∶P 作为土壤碳氮磷矿化和固持作用的指标之一,可反映土壤养分的限制情况以及土壤内部碳氮磷循环特征(王绍强等,2008)。土壤 C∶N常被用来衡量有机质的分解速率以及土壤氮素的矿化能力(李占斌等,2017)。本研究中,退耕恢复土壤 C∶N 显著高于常规耕作土壤,但各粒级团聚体中 C∶N 变化不显著(图 3a),表明虽然退耕恢复土壤有机质矿化分解速率相对于常规耕作处理较为缓慢,有利于有机质积累(李玮等,2015),但在同一粒级团聚体中,退耕恢复与常规耕作处理的有机质分解速率相当,各粒级团聚体 C∶N 变化几乎不受退耕恢复的影响。这与土壤碳、氮养分变化的协同机制有关,Tian 等(2010)研究发现,土壤 C∶N 相对稳定,土壤碳、氮元素应对环境条件的变化有着相近的响应规律(李玮等,2015),在其累积与消耗过程中存在相对固定的比值(Cleveland *et al.*, 2007),而团聚体作为土壤养分的主要载体,其 C∶N 是土壤碳氮养分平衡的微观表征。相比于常规耕作处理下各粒级团聚体间 C∶N 的相对固定(平均约 9.0),退耕恢复处理则加剧了>2 mm 粒级大团聚体与微团聚体(0.053~0.25 mm)之间的 C∶N 差异,使C∶N在微团聚体中达到了最低值(图 3a)。有研究表明,氮素的矿化过程在土壤中并不是均匀进行,微团聚体内的氮素矿化速率明显低于大团聚体(刘玮等,2013),加之退耕恢复土壤大团聚体中较高的有机碳含量削弱了氮素含量对 C∶N 的限制作用,导致 C∶N 在退耕恢复处理两粒级团聚体间的差异较大。

与 C∶N 不同,本研究中两处理间 C∶P 和 N∶P变异性较大,退耕恢复处理全土以及各粒级团聚体中 C∶P、N∶P 均显著高于常规耕作处理(图 3b,c)。原因在于:长期退耕恢复使土壤以及各粒级团聚体中有机碳和氮素含量均有不同程度的升高(图 2a,b),同时使磷素含量显著降低,从而导致退耕恢复处理下 C∶P、N∶P 相对较高。此外,作物和微生物对氮、磷元素的同化吸收利用具有不稳定性(王传杰等,2018),因而可增强土壤团聚体 C∶P 和 N∶P的变异程度。就指示作用而言,土壤 C∶P 是衡量磷有效性的重要指标(李玮等,2015),较低的 C∶P意味着磷有效性较高(王绍强等,2008)。本研究中,相比于常规耕作处理,长期退耕恢复土壤磷的有效性降低较为显著(图 3b)。这与该处理大团聚体(>2 和 0.25~2 mm)中磷素的有效性较低密切相关(图 3b)。郭万伟等(2009)研究表明,旱地红壤大团聚体中黏粒含量较高,且富含更多的游离氧化铁铝。而在酸性条件的红壤中,磷素可与铁铝反应生成难溶性磷酸盐,导致土壤磷素有效性降低(李寿田等,2003)。另外,土壤 N∶P 可表示土壤养分的相对平衡程度,常被用于预测土壤养分限制类型(王绍强等,2008)。本研究中,退耕恢复处理的全土及各团聚体中 N∶P 显著高于常规耕作处理,这一方面反映了常规耕作中的长期化肥施用加速了土壤氮的消耗,可能引起土壤氮素对植物生长的制约(孙娇等,2016),另一方面也进一步表明了长期退耕恢复增强了土壤磷素的限制作用。综合比较碳氮磷生态化学计量比的变化范围,本研究中长期退耕恢复与常规耕作处理间团聚体 C∶N、C∶P 和 N∶P 的变异程度从大到小的顺序为:(C∶P)>(N∶P)>(C∶N)。这反映出长期退耕恢复使土壤团聚体有机碳的累积速度较快,氮素含量的增加较缓,而磷素的养分限制更为突出。

4 结 论

与常规施肥耕作相比,长期退耕恢复增强了耕层土壤的团聚作用,有利于水稳性大团聚体(>0.25 mm)的形成,使土壤结构得到改善。

长期退耕恢复提升了土壤有机碳和全氮的含

量,同时显著降低了土壤全磷含量。其中,有机碳含量在各个粒级团聚体中均有显著升高,全氮含量则在大团聚体(>2 和 0.25~2 mm)与微团聚体(0.053~0.25 mm)中显著增加,而全磷含量在各粒级团聚体中均有显著降低。此外,长期退耕恢复土壤的>2 mm粒级大团聚体对全氮和全磷含量有显著的富集作用。考虑到团聚体对土壤养分的贡献率,0.25~2 mm 粒级大团聚体作为土壤碳氮磷养分的主要载体,对土壤养分的保持有重要作用。

长期退耕恢复显著提高了土壤 C∶N、C∶P 和 N∶P,但 C∶N 在各粒级团聚体中表现较为稳定,而 C∶P 和 N∶P 变异性较大,在各粒级土壤团聚体中均有显著升高。

总体来说,长期退耕恢复对红壤结构、团聚体质量均有明显改善作用,但同时也加剧了土壤以及团聚体中磷的养分限制。因此,在对南方旱地红壤的保护性利用过程中,应重视对土壤磷素的养分调控。

参考文献

艾 娜, 周建斌, 杨学云, 等. 2008. 长期施肥及撂荒对土壤氮素矿化特性及外源硝态氮转化的影响. 应用生态学报, **19**(9): 1937-1943.

鲍士旦. 2000. 土壤农化分析(第三版). 北京: 中国农业出版社.

曹良元, 张 磊, 蒋先军, 等. 2009. 长期垄作免耕对不同大小土壤团聚体中几种氮素形态分布的影响. 植物营养与肥料学报, **15**(4): 824-830.

陈恩凤, 关连珠, 汪景宽, 等. 2001. 土壤特征微团聚体的组成比例与肥力评价. 土壤学报, **38**(1): 49-53.

陈晓芬, 李忠佩, 刘 明, 等. 2013. 不同施肥处理对红壤水稻土团聚体有机碳、氮分布和微生物生物量的影响. 中国农业科学, **46**(5): 950-960.

崔江辉, 崔福柱, 薛建福, 等. 2018. 化肥减施对小麦-高粱系统土壤团聚体分布及其稳定性的影响. 作物杂志, (1): 126-132.

戴全厚, 刘国彬, 薛 萚, 等. 2007. 侵蚀环境退耕撂荒地水稳性团聚体演变特征及土壤养分效应. 水土保持学报, **21**(2): 61-64.

樊红柱, 陈庆瑞, 郭 松, 等. 2018. 长期不同施肥紫色水稻土磷的盈亏及有效性. 植物营养与肥料学报, **24**(1): 154-162.

郭万伟, 肖和艾, 吴金水, 等. 2009. 红壤旱土和水稻土团聚体中磷素的分布特点. 土壤学报, **46**(1): 85-92.

胡 宁, 马志敏, 蓝家程, 等. 2015. 石漠化山地植被恢复过程土壤团聚体氮分布及与氮素矿化关系研究. 环境科学, **36**(9): 3411-3421.

霍 琳, 武天云, 蔺海明, 等. 2008. 长期施肥对黄土高原旱地黑垆土水稳性团聚体的影响. 应用生态学报, **19**(3): 545-550.

冷延慧, 汪景宽, 李双异. 2008. 长期施肥对黑土团聚体分布和碳储量变化的影响. 生态学杂志, **27**(12): 2171-2177.

李寿田, 周健民, 王火焰, 等. 2003. 不同土壤磷的固定特征及磷释放量和释放率的研究. 土壤学报, **40**(6): 908-914.

李 玮, 郑子成, 李廷轩. 2015. 不同植茶年限土壤团聚体碳氮磷生态化学计量学特征. 应用生态学报, **26**(1): 9-16.

李占斌, 周 波, 马田田, 等. 2017. 黄土丘陵区生态治理对土壤碳氮磷及其化学计量特征的影响. 水土保持学报, **31**(6): 312-318.

刘恩科, 赵秉强, 梅旭荣, 等. 2010. 不同施肥处理对土壤水稳定性团聚体及有机碳分布的影响. 生态学报, **30**(4): 1035-1041.

刘 玮, 蒋先军. 2013. 耕作方式对土壤不同粒径团聚体氮素矿化的影响. 土壤, **45**(3): 464-469.

刘晓利, 何园球, 李成亮, 等. 2009. 不同利用方式旱地红壤水稳性团聚体及其碳、氮、磷分布特征. 土壤学报, **46**(2): 255-262.

刘中良, 宇万太. 2011. 土壤团聚体中有机碳研究进展. 中国生态农业学报, **19**(2): 447-455.

刘中良, 宇万太, 周 桦, 等. 2011. 长期施肥对土壤团聚体分布和养分含量的影响. 土壤, **43**(5): 720-728.

柳开楼, 黄 晶, 张会民, 等. 2018. 长期施肥对红壤旱地团聚体特性及不同组分钾素分配的影响. 土壤学报, **55**(2): 443-454.

邱莉萍, 张兴昌, 张晋爱. 2006. 黄土高原长期培肥土壤团聚体中养分和酶的分布. 生态学报, **26**(2): 364-372.

孙 娇, 赵发珠, 韩新辉, 等. 2016. 不同林龄刺槐林土壤团聚体化学计量特征及其与土壤养分的关系. 生态学报, **36**(21): 6879-6888.

王传杰, 王齐齐, 徐 虎, 等. 2018. 长期施肥下农田土壤-有机质-微生物的碳氮磷化学计量学特征. 生态学报, **38**(11): 1-6.

王经纬, 王艳玲, 姚 怡, 等. 2017. 长期施肥对旱地红壤团聚体磷素固持与释放能力的影响. 土壤学报, **54**(5): 1240-1250.

王清奎, 汪思龙. 2005. 土壤团聚体形成与稳定机制及影响因素. 土壤通报, **36**(3): 415-421.

王绍强, 于贵瑞. 2008. 生态系统碳氮磷元素的生态化学计量学特征. 生态学报, **28**(8): 3937-3947.

武 均, 蔡立群, 罗 迪, 等. 2014. 不同耕作措施对陇中黄土高原雨养农田土壤团聚体稳定性和 C、N、P 的影响. 水土保持学报, **28**(6): 234-239.

武 均, 蔡立群, 齐 鹏, 等. 2015. 不同耕作措施下旱作农田土壤团聚体中有机碳和全氮分布特征. 中国生态农业学报, **23**(3): 276-284.

许 泉, 芮雯奕, 刘家龙, 等. 2006. 我国农田土壤碳氮耦合特征的区域差异. 生态与农村环境学报, **22**(3): 57-60.

杨 宁, 邹冬生, 付美云, 等. 2016. 紫色土丘陵坡地恢复中土壤团聚体特征及其与土壤性质的关系. 生态学杂志, **35**(9): 2361-2368.

曾全超, 李 鑫, 董扬红, 等. 2016. 黄土高原延河流域不同植被类型下土壤生态化学计量学特征. 自然资源学报, **31**(11): 1881-1891.

张福锁, 王激清, 张卫峰, 等. 2008. 中国主要粮食作物肥料利用率现状与提高途径. 土壤学报, **45**(5): 915-924.

赵少华, 宇万太, 张 璐, 等. 2004. 土壤有机磷研究进展. 应用生态学报, **15**(11): 2189-2194.

周正虎, 王传宽, 张全智. 2015. 土地利用变化对东北温带幼龄林土壤碳氮磷含量及其化学计量特征的影响. 生态学报, **35**(20): 6694-6702.

Cleveland CC, Liptzin D. 2007. C∶N∶P stoichiometry in soil: Is there a "Redfield ratio" for the microbial biomass? *Biogeochemistry*, **85**: 235-252.

Devine S, Markewitz D, Hendrix P, *et al*. 2014. Soil aggregates and associated organic matter under conventional tillage, no-tillage, and forest succession after three decades. *PLoS ONE*, **9**: e84988.

Elser JJ, Sterner RW, Gorokhova E, *et al*. 2000. Biological stoichiometry from genes to ecosystems. *Ecology Letters*, **3**: 540-550.

Gelaw AM, Singh BR, Lal R. 2015. Organic carbon and nitrogen associated with soil aggregates and particle sizes under different land uses in Tigray, Northern Ethiopia. *Land Degradation & Development*, **26**: 690-700.

Roldán A, Caravaca F, Hernández MT, *et al*. 2003. No-tillage, crop residue additions, and legume cover cropping effects on soil quality characteristics under maize in Patzcuaro watershed (Mexico). *Soil and Tillage Research*, **72**: 65-73.

Six J, Elliott ET, Paustian K, *et al*. 1998. Aggregation and soil organic matter accumulation in cultivated and native grassland soils. *Soil Science Society of America Journal*, **62**: 1367-1377.

Tian H, Chen G, Zhang C, *et al*. 2010. Pattern and variation of C∶N∶P ratios in China's soils: A synthesis of observational data. *Biogeochemistry*, **98**: 139-151.

Tisdall JM, Oades JM. 1982. Organic matter and water-stable aggregates in soils. *Journal of Soil Science*, **33**: 141-163.

Udom BE, Ogunwole JO. 2015. Soil organic carbon, nitrogen, and phosphorus distribution in stable aggregates of an Ultisol under contrasting land use and management history. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, **178**: 460-467.

Wang Y, Wang Z, Zhang Q, *et al*. 2018. Long-term effects of nitrogen fertilization on aggregation and localization of carbon, nitrogen and microbial activities in soil. *Science of the Total Environment*, **624**: 1131-1139.

Zhang B, Horn R. 2001. Mechanisms of aggregate stabilization in Ultisols from subtropical China. *Geoderma*, **99**: 123-145.

Zhang MK, He ZL, Chen GC, *et al*. 1996. Formation and water stability of aggregates in red soils as affected by organic matter. *Pedosphere*, **6**: 39-45.

作者简介 宋莉群,女,1992 年生,硕士研究生,研究方向为土壤生物地球化学。E-mail: slq126yx@ 126.com

责任编辑 魏中青