

DOI: 10.5846/stxb201403290589

周正虎, 王传宽, 张全智. 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, 2015, 35(20): - .  
Zhou Z H, Wang C K, Zhang Q Z. The effect of land use change on soil carbon, nitrogen, and phosphorus contents and their stoichiometry in temperate sapling stands in northeastern China. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(20): - .

# 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

周正虎, 王传宽\*, 张全智

东北林业大学生态研究中心, 哈尔滨 150040

**摘要:** 土地利用方式的改变打破森林生态系统原有的碳氮磷平衡, 从而显著地影响森林生态系统的生物地球化学循环过程。以地段相邻、林龄相同(10年生)、原始植被一致但土地利用方式不同(无土壤翻动的天然次生林[NS]、间作大豆而土壤翻动中等的人工林[MS]、间作人参而土壤翻动严重的次生林[SS])的温带幼龄林为对象, 探索土地利用变化对土壤碳、氮、磷含量及相互关系的影响。结果显示:(1)土地利用方式显著改变表层和深层土壤碳含量, 各土壤层次碳含量均呈现 NS > MS > SS; 而氮含量仅在 0—20 cm 具有显著性差异 ( $P < 0.05$ ); 不同土地利用类型之间磷含量无显著差异 ( $P > 0.05$ )。表明碳氮磷对土地利用变化敏感程度不同。(2)SS 土壤碳氮比(C/N)和碳磷比(C/P)低于 NS 和 MS, 而 NS 和 MS 之间 C/N 和 C/P 因土壤层次而异。不同土壤层次氮磷比(N/P)均随土壤翻动强度的增加而显著减小 (NS > MS > SS,  $P < 0.05$ ), 且随土层加深而降低。表明 N/P 相对于 C/N 和 C/P 可能对土地利用变化具有更优生态指示功能。(3)土地利用变化显著改变土壤碳-氮、碳-磷、氮-磷的耦合关系。土壤碳-氮(C-N)之间存在极显著 ( $P < 0.001$ ) 的线性关系, 其中 3 种土地利用方式的土壤 C-N 关系的斜率差异不显著 ( $P = 0.458$ , 共同斜率为 11.1), 但截距差异显著 ( $P < 0.001$ )。结合本地区 and 全球文献数据分析指出, 森林土壤碳氮关系既有大尺度上的普适性, 又有小尺度上对土地利用方式响应的局域分异性。

**关键词:** 土地利用变化; 生物地球化学; 化学计量; 碳氮耦合

## The effect of land use change on soil carbon, nitrogen, and phosphorus contents and their stoichiometry in temperate sapling stands in northeastern China

ZHOU Zhenghu, WANG Chuankuan\*, ZHANG Quanzhi

Center for Ecological Research, Northeast Forestry University, Harbin 150040, China

**Abstract:** Anthropogenic land use change alters the equilibrium among soil carbon (C), nitrogen (N), and phosphorus (P) in the forest ecosystem, likely affecting these biogeochemical cycles. In this study, conducted in northeastern China, we measured C, N, and P contents along soil profiles in adjacent sapling stands identical in age (10 years) and primary vegetation, but differing in land use type. Land use types included naturally regenerated stands without soil disturbance (NS), moderately disturbed stands (two-year interplanting of soybean after artificial reforestation, MS), and severely disturbed stands (natural reforestation after planting *Panax ginseng* for 10 years, SS). Our objective was to examine the effects of land use change on soil C, N, and P contents and their stoichiometry. Our results showed that: (1) Land use change significantly altered both top- and sub-soil C contents, which descended in the order NS > MS > SS for each soil horizon. However, land use markedly influenced only top-soil N contents and did not significantly influence P content along

基金项目: 林业公益性行业专项(201104009-05); 国家“十二五”科技支撑项目(2011BAD37B01); 教育部长江学者和创新团队发展计划(IRT1054)

收稿日期: 2014-03-29; 网络出版日期: 2014-12-18

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: wangck-cf@nefu.edu.cn

the entire soil profile ( $P > 0.05$ ). These results suggest differing sensitivities of elements to land use change. (2) The C/N and C/P ratios among the three land use types were lowest for SS and differed between NS and MS depending on the soil horizon. Vertical patterns of C/N and C/P ratios differed among land use types, but N/P ratio was consistently constrained by land use change. N/P ratios descended in the order NS > MS > SS within each soil horizon and decreased with soil depth ( $P < 0.05$ ), suggesting that N/P may be a better ecological indicator of response to land use change than C/N and C/P. (3) Land use change significantly affected coupled relationships between C-N, C-P, and N-P. Soil C and N contents were linearly correlated ( $P < 0.001$ ), regardless of the land use type, with a common slope of 11.1 but significantly different intercepts ( $P < 0.001$ ). This result, together with the synthesis of published local and global datasets, reflects a large-scale general C-N relationship and a small-scale heterogeneous response of C-N stoichiometry to local land use change.

**Key Words:** land use change; biogeochemistry; stoichiometry; carbon-nitrogen coupling

人为活动造成土地利用方式的改变势必会打破陆地生态系统原有的碳氮磷平衡<sup>[1-3]</sup>。土壤翻动不但破坏了土壤团聚体,而且也加速了土壤中动物植物微生物残体、排泄物、分泌物以及土壤腐殖质的破碎速率,使其更易被微生物分解、化学氧化、物理释放进入大气和水域生态系统<sup>[4, 5]</sup>,从而使土壤成为大气碳库的重要来源<sup>[6]</sup>。与此同时,土地利用变化也会造成氮磷元素的丢失<sup>[7-9]</sup>,但丢失程度取决于干扰的强度<sup>[1, 10]</sup>。例如,Guo 等<sup>[1]</sup>综合分析全球数据表明:天然林转变为人工林和农田过程中土壤碳分别减少了 13% 和 42%,而农田转变为天然次生林和人工林时土壤碳分别增加了 18% 和 53%;Xu 等<sup>[10]</sup>研究表明,在天然林到第一代人工林再到第二代人工林转变过程中土壤碳氮磷含量均显著减小。

生态化学计量受国内外学者的广泛关注,特别是研究碳、氮、磷化学计量特征可以反映土壤内部碳氮磷循环,具有重要的生态指示作用,因而对认识生态系统碳汇潜力及其对气候变化的响应具有重要意义<sup>[11-15]</sup>。Tian<sup>[16]</sup>、Cleveland 等<sup>[17]</sup>分别从区域尺度和全球尺度上探讨土壤 C/N、N/P 和 C/P 化学计量比时得出:虽然在大尺度上不同生态系统之间土壤碳、氮、磷含量具有显著的变异性,但 C/N 的空间变异较小;而由于磷元素和碳氮元素来源的差异性,土壤 C/P 和 N/P 随气候、土壤类型、土壤深度和风化阶段而呈现显著的空间变异性。而且,天然生态系统土壤 C/N 在不同层次间基本保持恒定<sup>[16, 18]</sup>。Yang 等<sup>[18]</sup>研究也发现,天然高寒草原土壤碳-氮之间具有显著的共斜率线性关系,且这种共斜率关系也存在于不同天然生态系统中<sup>[17]</sup>及其不同演替阶段<sup>[19]</sup>。

东北地区历经半个多世纪的采伐、垦荒等人为干扰,林地面积显著减小,原始林基本殆尽,森林年龄结构趋于单一化和低龄化。随着退耕还林、天然林保护等林业生态工程的实施,出现大面积的天然次生林和人工林<sup>[20, 21]</sup>。然而,这种土地利用方式转变对土壤碳氮磷含量、生态化学计量特征及其相互关系的影响还不清楚。本研究以帽儿山生态站的相邻地段、相同林龄(均为 10 年生)、原始植被一致但土地利用方式不同的 3 种温带幼龄林为对象,最大程度地消除土壤本身异质性,以便探索土壤碳、氮、磷含量及其生态化学计量关系对土地利用变化的响应。

## 1 研究方法

### 1.1 研究地概况与试验设计

研究地设在帽儿山森林生态站(45°20'N, 127°30'E)。平均海拔 400 m,平均坡度 10°—15°,地带性土壤为暗棕色森林土。气候属大陆性季风气候,夏季温暖湿润,冬季寒冷干燥,平均年降水量约 629 mm,50%的降水集中在 6 月到 8 月,平均年蒸发量约 864 mm,年均气温 3.1 °C,一月份平均气温 18.5 °C,7 月份平均气温 22.0 °C。无霜期约为 120—140 d<sup>[22]</sup>。现有植被是原地带性植被阔叶-红松林经干扰后形成的天然次生林和人工林。

本研究选择帽儿山生态站相邻地段、相同林龄(土壤扰动后自然更新 10 年,林分现已郁闭)但土地利用

方式不同的 3 种温带森林类型,分别为:无土壤翻动的天然次生林 [NS]、间作大豆而土壤翻动中等的人工林 [MS]、间作人参而土壤翻动严重的次生林 [SS]。NS 为皆伐后天然更新次生林,土壤无任何扰动,其中优势树种为白桦 (*Betula platyphylla* Suk.), 伴生有春榆 (*Ulmus japonica* (Rehch.) Sarg.)、水曲柳 (*Fraxinus mandshurica* Rupr.)、大青杨 (*Populus ussuriensis* Kom.)、黄菠萝 (*Phellodendron amurense* Rupr.) 和五角槭 (*Acer mono* Maxim.)。MS 为皆伐后人工栽植水曲柳 (株行距 1.5 m × 1.5 m), 同时翻土深度 15 cm 左右,间作大豆 2 年之后混入天然更新树种白桦、春榆等。SS 为皆伐后翻土深度 40 cm 左右,作垄种植人参 10 年后天然更新的次生林,其树种组成与 NS 相似。于 2013 年 9 月在每林型中随机设立 3 块 20 m × 30 m 的固定样地,并对样地进行植被调查。

## 1.2 样品采集与分析

2013 年 10 月,在每块样地内随机选取 5 个样点,采用内径为 50 mm 的土钻分层取样,取样深度分别为:0—10 cm、10—20 cm、20—30 cm、30—40 cm、40—50 cm、50—60 cm。土壤样品风干后全部过 2 mm 筛,除去所有根系和石砾,将土样粉碎后作为分析土样。称取 65 °C 烘干粉碎土样约 0.100 g,采用 multi N/C 3000 分析仪和 HT 1500 Solids Module 分析仪 (Analytik Jena AG, Germany) 燃烧法测定土壤全碳含量。另称取烘干的粉碎土样约 0.200 g,加入 5 mL 浓硫酸,3 mL 过氧化氢 420 °C 消煮 90 min (消煮完全至白色),待冷却后定容至 100 mL,静置 12 h 后吸取上清液利用连续流动分析仪 (BRAN+LUEBBE-AA3, Germany) 测定氮、磷含量。

## 1.3 数据分析

以样地为统计分析试验单位,采用单因素方差分析 (one-way ANOVA) 和最小显著差异法 (LSD) 比较不同林型、土壤层次的碳、氮、磷含量及其生态化学计量特征;回归分析法建立不同土地利用方式下土壤碳、氮、磷含量之间的最优耦合模型 (以每样方各土层平均土壤碳、氮、磷含量为数据分析单位),并采用 SMATR 检验耦合模型的斜率同质性<sup>[23]</sup>。直线回归系数差异性检验由 SMATR Version 2.0 软件完成,其它统计分析均由 SPSS19.0 软件完成。

## 2 结果

### 2.1 不同土地利用方式下土壤碳、氮、磷含量的垂直分布

土地利用方式显著影响土壤碳含量 (图 1A)。各层次土壤碳含量均呈现 NS 最高、MS 居中、SS 最低。NS

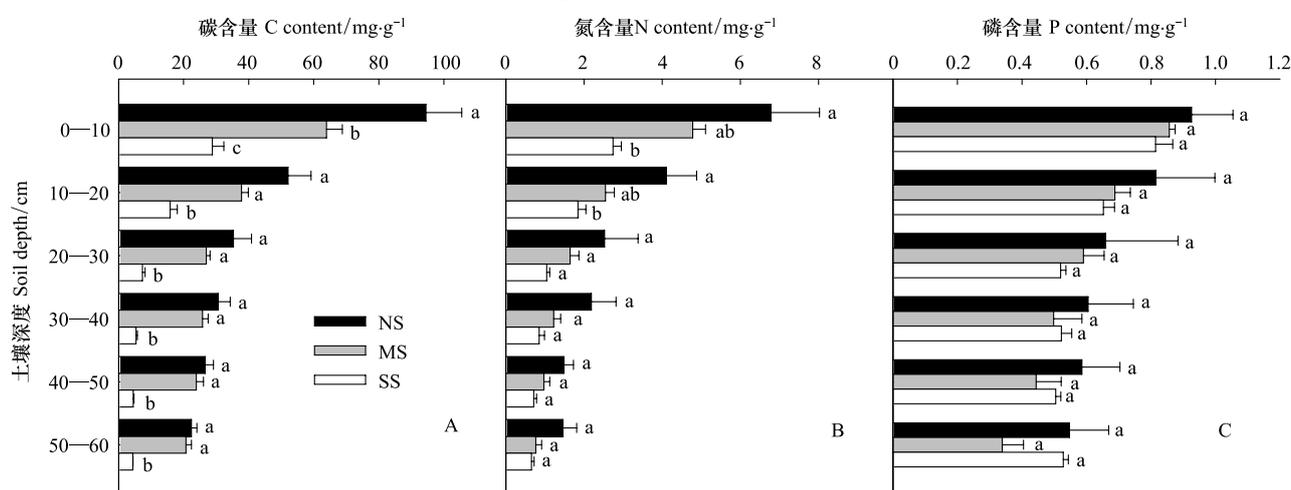


图 1 不同土地利用类型下土壤碳、氮、磷含量的垂直分布

Fig.1 Vertical distribution of soil carbon (C), nitrogen (N) and phosphorus (P) contents for different land use types

误差线为标准误 ( $n=3$ ); 误差线上的不同字母表示同一土壤层次不同土地利用间显著性差异分组 ( $\alpha=0.05$ ); NS、MS、SS 分别表示无土壤翻动的天然次生林 (naturally regenerated stands)、间作大豆而土壤翻动中等的人工林 (moderately disturbed stands)、间作人参而土壤翻动严重的次生林 (severely disturbed stands)

各土壤层次碳含量平均比 MS 高 19.4% (变化范围为 7.4%—32.4%), 比 SS 高 77.4% (变化范围为 69.5%—83.1%)。其中, 除 0—10 cm 外, 其它各层次碳含量在 NS 和 MS 之间差异不显著 ( $P>0.05$ ), 但两者均显著高于 SS ( $P<0.05$ )。NS ( $F_{5,12} = 19.52, P<0.001$ )、MS ( $F_{5,12} = 38.71, P<0.001$ ) 和 SS ( $F_{5,12} = 31.55, P<0.001$ ) 土壤碳含量均随土层加深而显著降低 (图 1A), 但同一林型 20 cm 以下不同土层之间碳含量均无显著性差异 ( $P>0.05$ )。

与碳含量相同, 各土壤层次氮含量均呈现 NS > MS > SS, 且具有相同垂直分布格局 (图 1B)。但是, 除了 0—10 cm ( $F_{2,6} = 7.18, P = 0.026$ )、10—20 cm ( $F_{2,6} = 5.77, P = 0.040$ ) 外, 其它各土层氮含量在 3 种土地利用类型之间差异均不显著 ( $P>0.05$ )。NS 各土壤层次氮含量平均比 MS 高 38.0% (变化范围为 29.5%—47.3%), 比 SS 高 56.8% (变化范围为 51.8%—60.8%)。

然而, 与碳、氮含量不同, 不同土地利用类型之间各土层的磷含量均无显著差异 ( $P>0.05$ )。NS 和 MS 土壤磷含量随着土层的加深而递减, 而 SS 的土壤磷含量呈现先递减、20 cm 以下保持基本稳定的趋势 (图 1C)。

## 2.2 土地利用变化对土壤碳、氮、磷生态化学计量特征的影响

土地利用变化显著影响土壤 C/N, C/P 和 N/P (图 2)。其中, 除 0—10 cm 外, 其它各层 C/N 在不同土地利用方式之间具有显著差异 ( $P<0.05$ ), 并呈现 MS > NS > SS。NS 不同土层之间 C/N 基本保持恒定 ( $F_{5,12} = 0.923, P = 0.499$ ), 平均值为 15.5; 而 MS 的 C/N 随着土壤深度的增加而显著增加 ( $F_{5,12} = 7.64, P = 0.002$ ), 变化范围为 13.4—28.6; SS 的 C/N 随着土壤深度的增加而减小, 但不同土层之间无显著差异 ( $F_{5,12} = 1.744, P = 0.199$ ), 平均 C/N 为 7.7。NS 和 MS 各土层 C/P 均显著高于 SS ( $P<0.05$ ), 而 NS 和 MS 之间仅在 0—10 cm 层具有显著差异 ( $P = 0.006$ )。土壤翻动显著降低了土壤 N/P, 不同土地利用方式下 N/P 呈现: MS > NS > SS, 且随土层加深而显著减小 ( $P<0.05$ )。

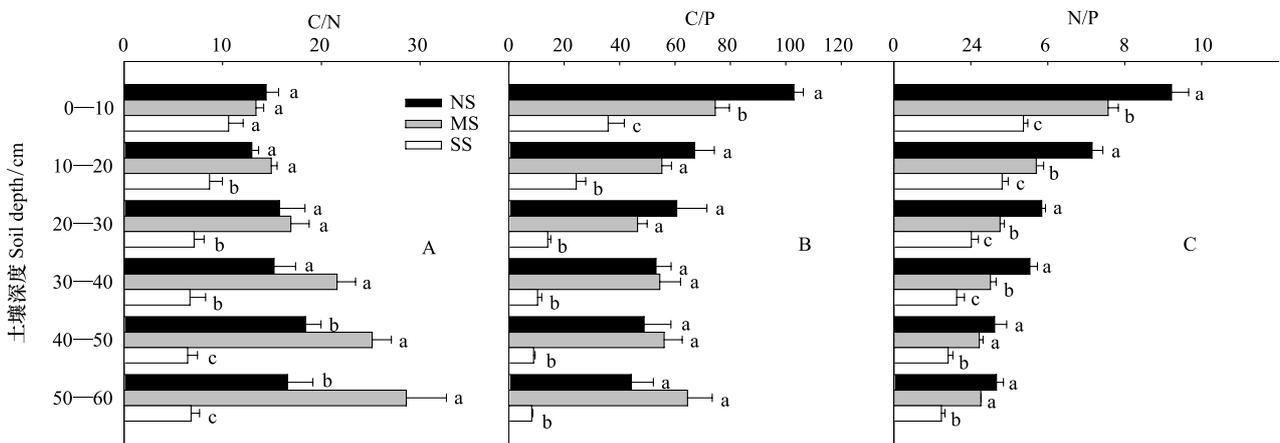


图 2 不同土地利用类型下土壤 C/N、C/P 和 N/P 的垂直格局

Fig.2 Vertical patterns of C/N, C/P and N/P for different land use types

误差线为标准误 ( $n = 3$ ); 误差线上的不同字母表示同一土壤层次不同土地利用间显著性差异分组 ( $\alpha = 0.05$ )

土壤碳氮磷含量的耦合模型因元素和土地利用方式而异 (图 3)。碳-氮 (C-N) 之间具有极显著 ( $P<0.001$ )

的线性关系。进一步的 SMATR 斜率同质性检验表明, 不同土地利用方式之间 C-N 化学计量关系斜率无显著性差异 ( $t = 2.048, P = 0.458$ ), 共同斜率为 11.1, NS 和 MS 之间截距无显著差异 ( $P>0.05$ ), 但两者均显著大于 SS ( $P<0.001$ ) (表 1)。土壤碳磷 (C-P)、氮磷 (N-P) 相互关系因土地利用方式而异, NS 和 MS 呈现极显著 ( $P<0.001$ ) 的指数关系, 而 SS 却为直线关系 (图 3B, 3C)。

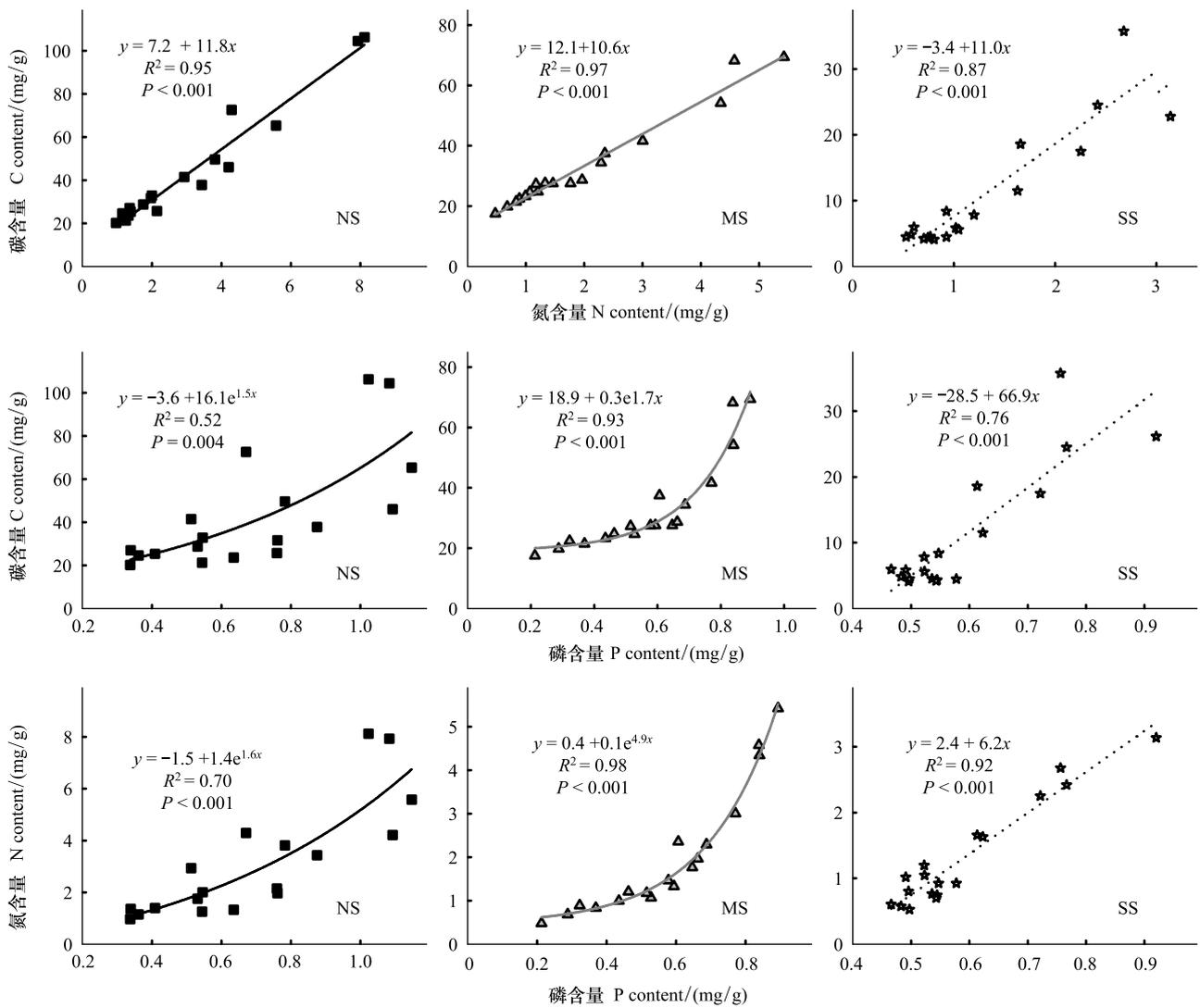


图3 不同土地利用类型下土壤碳、氮、磷相互关系

Fig.3 Relationships between soil carbon (C), nitrogen (N) and phosphorus (P) contents for different land use types

A、B、C 分别表示碳-氮、碳-磷、氮-磷相互关系;误差线为标准误( $n=18$ )

表1 不同土地利用方式下土壤碳-氮关系斜率、截距同质性检验

Table 1 Test for common slope and intercept of C-N stoichiometric relationships for different land use types

土地利用方式 Land use	$n$	斜率 Slope [95% CI]	$t$	$p$	共同斜率 Common Slope [95% CI]	$P$	截距 Intercept [95% CI]	$WALD$	$p$
NS	18	11.8 [10.4, 13.2]	2.048	0.458	11.1 [10.2, 11.8]	<0.001	7.2a [1.8, 12.5]	178.4	<0.001
MS	18	10.6 [9.6, 11.6]					12.1a [9.7, 14.5]		
SS	18	11.0 [8.8, 13.3]					-3.4b [-6.8, 0]		

$p$  表示斜率或截距同质性检验显著性水平,  $P$  表示共同斜率的显著性水平;  $n$  为样本数; 截距后字母表示不同土地利用方式下截距的差异性 ( $\alpha=0.05$ );  $WALD$  是 SMATR 软件截距差异性分析中的统计量<sup>[23]</sup>;

NS、MS、SS 分别表示无土壤翻动的天然次生林 (naturally regenerated stands)、间作大豆而土壤翻动中等的人工林 (moderately disturbed stands)、间作人参而土壤翻动严重的次生林 (severely disturbed stands)

### 3 讨论

#### 3.1 土地利用方式对土壤碳、氮、磷含量及其垂直分布的影响

本研究中相邻地段、相同林龄的不同土地利用方式下 3 种温带幼龄林, 因土壤翻动历史、程度和类型不

同,其土壤碳、氮含量产生了显著的差异。无论是表层还是深层,土壤翻动均促使土壤碳、氮含量的丢失(图 1A、1B)。其中,MS 平均碳丢失率为 19.4%,与 Guo 等<sup>[1]</sup>报道的全球平均值(13%)相当。这种中等程度土壤扰动导致的碳丢失主要发生在土壤表层(0—10 cm),而对深层土壤的碳含量影响不显著(图 1A),这是因为间作大豆 2 年过程中只翻动了 0—15 cm,深层土壤结构没有受到破坏,但对表层土壤的翻动过程中无疑增加了土壤的通透性,一定程度上促进了深层土壤碳的释放,从而呈现出轻微的碳丢失,这与以往的研究相符<sup>[24, 25]</sup>。然而,翻动强度大(作垄深达 40 cm 左右)、时间长(10 年)的 SS 平均碳丢失率高达 77.4%,远高于 Guo 等<sup>[1]</sup>报道的全球森林向农田转变过程中 42%的碳丢失率,也高于 Ellert 等<sup>[8]</sup>报道的长期耕作导致 34%的碳丢失率。这种重度土壤翻动显著促使了表层和深层土壤的碳丢失,这是因为种植人参过程中作垄可达 40 cm 处,一方面土壤结构遭到严重破坏,另一方面也加大了深层土壤和外界环境的接触机会与面积,从而促进了微生物对土壤有机质的分解导致的碳释放以及随地表径流的丢失。此外,Don 等<sup>[26]</sup>整合分析也表明土地利用变化过程中土地利用变化的类型、土壤水热状况以及土壤属性(如土壤类型,粘土含量等)只解释了 55%的土壤碳变化,而将近一半的变异很可能是由土壤翻动强度的差异性所致。

将本研究结果与本地区的顶极群落和成熟林相比:NS 的碳含量相对于天然次生成熟林(蒙古栎林、硬阔叶林、杨桦林<sup>[27]</sup>)的表层土壤(0—10 cm)碳丢失率为 6.6%;而 3 种天然次生成熟林表层土壤平均碳含量比本地区阔叶红松原始林<sup>[3]</sup>低 47.9%。与碳含量相同,各土壤层次氮含量也均呈现 NS > MS > SS(图 1)。NS 各土壤层次氮含量平均比 MS 高 38.0%,比 SS 高 56.8%,可见土壤氮含量对土地利用方式的响应与碳含量相似。土壤翻动造成碳氮含量的同时丢失已得到众多学者的证实<sup>[7-9]</sup>,这是因为土壤有机质在分解过程中每释放 25 份碳素就会消耗 1 份氮素<sup>[28]</sup>。综上所述,在温带森林从原始林-天然次生林-人工林-农田转变过程中,土壤碳氮含量不断降低。因此,采用适当的退耕还林和森林更新措施可以逆转土壤的碳氮丢失,从而充分发挥森林土壤的碳氮固持潜能<sup>[26, 29]</sup>。

土壤碳和氮主要来源于植物地上地下凋落物的分解,其含量受植被、气候、人为活动等影响较大<sup>[28]</sup>。因此,土壤对土壤碳氮的垂直分布的影响会因土地利用而发生变化,但其主导能力随着土壤深度的增加而降低;而深层土壤碳氮含量主要决定于土壤本身质地,如粘土含量、土壤类型等<sup>[18, 30-32]</sup>。然而,长期的重度土壤翻动也会导致深层碳氮含量减小(图 1A、1B)。这表明量化在退耕还林过程中长期耕作农田的深层土壤碳氮汇功能也是必要的<sup>[26, 33]</sup>。与土壤碳氮不同,土壤磷主要来源于岩石风化,其含量大小更大程度上取决于立地的地质特征,而受人为影响较小<sup>[3, 34]</sup>。本研究中 0—30 cm 土层磷含量呈现 NS > MS > SS,这可能是土壤翻动促使土壤有机磷的分解,并随地表径流而流失的缘故<sup>[32]</sup>。

### 3.2 土壤碳、氮、磷生态化学计量特征对土地利用变化的响应

Sistla 等<sup>[35]</sup>指出,从局部到整体研究生态化学计量的可塑性和适应性是理解生态系统碳和养分循环对全球变化响应的有效途径。与 Tian<sup>[16]</sup>、Cleveland 等<sup>[17]</sup>大尺度研究结果不同,本研究中 NS 和 MS 土壤 C/N 随土层加深而呈现出增加的趋势。Hamer 等<sup>[36]</sup>也报道了 C/N 的这种垂直分布格局。进一步分析刘爽等<sup>[27]</sup>报道的当地 5 种温带成熟林结果也显示,10—20 cm 土壤 C/N(20.1)高于 0—10 cm(16.7),而 C/N 与土壤有机质分解速率成反比<sup>[14]</sup>,这说明本地区深层土壤具有较高的碳固存潜力<sup>[37]</sup>,且因本地区深层土壤温度较低、土壤微生物分解速率较慢、粘粒含量较高而相对稳定。NS 和 MS 之间的差异性可能是因为间作大豆 2 年中对土壤的翻动促进了表层有机质向深层的输入而补充了翻动导致的有机质输出,而在这些动态变化过程中碳对外界干扰较氮更敏感<sup>[38]</sup>;另一方面本研究中 NS 和 MS 具有不同的植被组成,而植被特征一定程度上会影响土壤 C/N 的垂直分布。例如,最近王建林等<sup>[39]</sup>发现,不同高寒草地类型下土壤 C/N 具有 5 种不同的剖面分布型。此外,也可能是由于深层土壤碳氮的小尺度空间异质性所导致<sup>[40]</sup>。种植人参过程中的重度土壤翻动导致了 C/N 的显著减小,经过 10 年的恢复,SS 仅表层土壤 C/N 和 NS 与 MS 无显著差异,这说明尽管本地区森林深层土壤具有稳定而又较高的碳含量<sup>[37]</sup>,但是在土地利用变化过程中一旦发生碳丢失,便需要相当长的时间才能恢复。

同样,土地利用变化也显著影响土壤 C/P 和 N/P。3 种不同土地利用方式下的 C/P 的剖面分布与 C/N 类似。相对于 C/N、C/P、N/P 垂直分布,与 Tian 等<sup>[16]</sup> 研究结果相符,且不同土壤层次之间均呈现 NS > MS > SS。这说明在消除了土壤本身异质性的小尺度上,土壤 N/P 可能比 C/N 和 C/P 与土地利用变化具有更高的同步性(随土壤翻动强度的增加而显著减小,图 2C)。林丽等<sup>[13]</sup> 也发现,土壤 N/P 对草地退化演替的敏感性较高。因此,N/P 比 C/N 和 C/P 对外界环境变化可能具有更优的生态指示功能。表层土壤 C/N、C/P 和 N/P 均呈现 SS < MS < NS,说明在森林恢复过程中会受到氮和磷限制。然而,尽管 Koerselman<sup>[41]</sup>、Tessier<sup>[42]</sup> 等先后通过综述植被 N/P 来分析其对养分限制的指示作用,但由于受土壤本身碳氮磷绝对含量的影响,目前有关土壤碳氮磷化学计量对土壤养分限制的指示作用还无定论<sup>[14]</sup>。

本研究结果表明,3 种林型土壤碳-氮-磷之间存在极显著的耦联关系(图 3)。Cleveland 等<sup>[17]</sup> 在综述陆地生态系统土壤和微生物的“Redfield ratio<sup>[43]</sup>”时、Yang 等<sup>[19]</sup> 在综述全球森林演替过程中土壤碳氮动态变化以及 Tian 等<sup>[16]</sup> 在综合我国土壤碳氮磷化学计量特征时均发现土壤碳氮之间存在着显著的耦合关系。进一步的回归系数差异性分析显示,土壤碳-氮之间均存在显著的共斜率线性关系,但土地利用变化显著影响其截距( $P < 0.001$ , 表 2)。这表明土地利用变化并没有显著改变土壤碳-氮关系,而是通过改变其直线关系的截距来影响土壤碳氮的丢失以及 C/N,这与最近研究相符<sup>[34, 44-45]</sup>。

为了进一步验证森林土壤碳氮化学计量关系的普适性,我们将本研究中的幼龄林和同一地区的 5 种典型森林类型的成熟林(即红松人工林、落叶松人工林、硬阔叶林、蒙古栎和杨桦林)<sup>[27]</sup> 以及 Cleveland 等<sup>[17]</sup> 的全球不同森林生态系统土壤碳氮数据作综合分析。结果发现,不同尺度的土壤碳-氮之间线性关系的斜率均无显著性差异( $t = 2.336$ ,  $P = 0.749$ ),其共同斜率为 11.2 (95%置信区间为 [10.3, 11.8],  $P < 0.001$ ; 图 4)。全球尺度上碳-氮之间线性关系的截距与 0 无显著性差异(95%置信区间为 [-4.5, 15.9])。这些结果反映了土壤 C/N 在大尺度上恒定性,这种森林土壤碳氮关系的普适性在陆地生态系统生物地球化学循环研究中具有重要意义<sup>[18]</sup>。然而,大尺度上的异质性又掩盖了 C-N 关系截距的差异性,这从另一方面说明小尺度上研究碳-氮之间线性关系截距的差异性也具有重要的生态指示作用。

与碳-氮关系不同,在最大程度消除土壤本身异质性的情况下,土壤碳-磷、氮-磷之间的相互关系因土地利用方式而异。NS 和 MS 呈现极显著的指数关系,而 SS 却为直线关系(图 3B、3C)。Chen 等<sup>[3]</sup> 发现土壤磷含量对土地利用变化的响应与碳和氮并不相同,土壤全磷含量变化的不确定性同样在落演替过程中发现<sup>[13]</sup>。这说明磷元素和碳氮元素不仅在来源上不同,且对外界干扰的响应机制可能也不同<sup>[16]</sup>,从而导致碳-磷、氮-磷关系的局域性。

#### 4 结论

(1) 土壤翻动会导致整个土壤剖面碳含量的显著减小,而氮含量仅在 0—20 cm 显著变化,而土壤磷含量保持恒定,说明土壤碳氮磷含量对土地利用变化响应机制可能不同。NS 各土壤层次碳含量平均比 MS 和 SS 分别高 19.4% 和 77.4%,氮含量平均比 MS 和 SS 分别高 38% 和 56.8%,表明土壤翻动强度越大、持续时间越

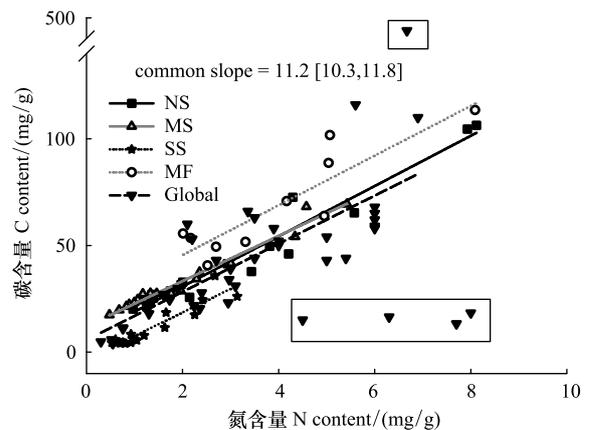


图 4 普适性土壤碳-氮关系

Fig. 4 Generalized relationships between soil carbon (C) and nitrogen (N)

NS、MS、SS 分别表示本研究中不同土地利用方式幼龄林;MF 表示本地区的成熟林(mature forest)土壤碳-氮关系,土壤碳氮数据来自刘爽等<sup>[27]</sup>;Global 表示全球森林生态系统土壤碳-氮关系,数据来源于 Cleveland 等<sup>[17]</sup>;方框中数据表示异常值

长,造成土壤碳氮丢失越严重。

(2)相比与 NS 和 MS,各土层 SS 的 C/N、C/P 均最低,而 NS 和 MS 之间大小因土壤层次而异。3 种土地利用方式下 C/N 和 C/P 具有不同的垂直分布。与 C/N 和 C/P 不同,各土层 N/P 与土地利用变化同步(NS > MS > SS),且均为从高到低剖面分布。表明土壤碳氮磷学计量比具有可塑性与适应性,氮磷化学计量比作为土地利用变化的敏感指标优于碳氮和碳磷计量比。

(3)不同土地利用类型的 C-P 和 N-P 具有不同的耦合关系。其中 C-N 关系的斜率无显著性差异,而其截距的差异显著。这反映了森林土壤碳氮关系在大尺度上的普适性和小尺度上对土地利用方式的局域差异性。

**致谢:**帽儿山森林生态站提供的野外基础支持。

#### 参考文献 (References):

- [ 1 ] Guo L B, Gifford R M. Soil carbon stocks and land use change;a meta analysis. *Global Change Biology*, 2002, 8(4):345-360.
- [ 2 ] Post W M, Kwon K C. Soil carbon sequestration and land-use change:processes and potential. *Global Change Biology*, 2000, 6(3):317-327.
- [ 3 ] Chen X W, Li B L. Change in soil carbon and nutrient storage after human disturbance of a primary Korean pine forest in Northeast China. *Forest Ecology and Management*, 2003, 186(1/3):197-206.
- [ 4 ] Baker J M, Ochsner T E, Venterea R T, Griffis T J. Tillage and soil carbon sequestration—What do we really know? *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2007, 118(1/4):1-5.
- [ 5 ] Cambardella C A, Elliott E T. Carbon and nitrogen distribution in aggregates from cultivated and native grassland soils. *Soil Science Society of America Journal*, 1993, 57(4):1071-1076.
- [ 6 ] Lal R. World cropland soils as a source or sink for atmospheric carbon. *Advances in Agronomy*, 2001, 71:145-191.
- [ 7 ] Ding F, Hu Y L, Li L J, Li A, Shi S W, Lian P Y, Zeng D H. Changes in soil organic carbon and total nitrogen stocks after conversion of meadow to cropland in Northeast China. *Plant and Soil*, 2013, 373(1/2):659-672.
- [ 8 ] Ellert B H, Gregorich E G. Storage of carbon, nitrogen and phosphorus in cultivated and adjacent forested soils of Ontario. *Soil Science*, 1996, 161(9):587-603.
- [ 9 ] Gál A, Vyn T J, Michéli E, Kladvík E J, McFee W W. Soil carbon and nitrogen accumulation with long-term no-till versus moldboard plowing overestimated with tilled-zone sampling depths. *Soil and Tillage Research*, 2007, 96(1/2):42-51.
- [ 10 ] Xu Z H, Ward S, Chen C R, Blumfield T, Prasolova N, Liu J X. Soil carbon and nutrient pools, microbial properties and gross nitrogen transformations in adjacent natural forest and hoop pine plantations of subtropical Australia. *Journal of Soils and Sediments*, 2008, 8(2):99-105.
- [ 11 ] 程滨, 赵永军, 张文广, 安树青. 生态化学计量学研究进展. *生态学报*, 2010, 30(6):1628-1637.
- [ 12 ] 李从娟, 雷加强, 徐新文, 唐清亮, 高培, 王永东. 塔克拉玛干沙漠腹地人工植被及土壤 CNP 的化学计量特征. *生态学报*, 2013, 33(18):5760-5767.
- [ 13 ] 林丽, 李以康, 张法伟, 杜岩功, 郭小伟, 李婧, 刘淑丽, 曹广民. 高寒矮嵩草群落退化演替系列氮、磷生态化学计量学特征. *生态学报*, 2013, 33(17):5245-5251.
- [ 14 ] 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. *生态学报*, 2008, 28(8):3937-3947.
- [ 15 ] 王维奇, 徐玲琳, 曾从盛, 仝川, 张林海. 河口湿地植物活体-枯落物-土壤的碳氮磷生态化学计量特征. *生态学报*, 2012, 31(23):7119-7124.
- [ 16 ] Tian H Q, Chen G S, Zhang C, Melillo J M, Hall C A S. Pattern and variation of C:N:P ratios in China's soils;a synthesis of observational data. *Biogeochemistry*, 2010, 98(1/3):139-151.
- [ 17 ] Cleveland C C, Liptzin D. C:N:P stoichiometry in soil:is there a "Redfield ratio" for the microbial biomass? *Biogeochemistry*, 2007, 85(3):235-252.
- [ 18 ] Yang Y H, Fang J Y, Guo D L, Ji C J, Ma W H. Vertical patterns of soil carbon, nitrogen and carbon:nitrogen stoichiometry in Tibetan grasslands. *Biogeosciences Discussions*, 2010, 7(1):1-24.
- [ 19 ] Yang Y H, Luo Y Q. Carbon:nitrogen stoichiometry in forest ecosystems during stand development. *Global Ecology and Biogeography*, 2011, 20(2):354-361.
- [ 20 ] Chen X W, Li B L, Lin Z S. The acceleration of succession for the restoration of the mixed-broadleaved Korean pine forests in Northeast China. *Forest Ecology and Management*, 2003, 177(1/3):503-514.
- [ 21 ] Deng X Z, Jiang Q O, Zhan J Y, He S J, Lin Y Z. Simulation on the dynamics of forest area changes in Northeast China. *Journal of Geographical*

- Sciences, 2010, 20(4):495-509.
- [22] Wang C K, Han Y, Chen J Q, Wang X C, Zhang Q Z, Bond-Lamberty B. Seasonality of soil CO<sub>2</sub> efflux in a temperate forest: Biophysical effects of snowpack and spring freeze-thaw cycles. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2013, 177:83-92.
- [23] Warton D I, Wright I J, Falster D S, Westoby M. Bivariate line-fitting methods for allometry. *Biological Reviews*, 2006, 81(2):259-291.
- [24] Mishra U, Ussiri D A N, Lal R. Tillage effects on soil organic carbon storage and dynamics in Corn Belt of Ohio USA. *Soil and Tillage Research*, 2010, 107(2):88-96.
- [25] Tiessen H, Stewart J W B, Bettany J R. Cultivation effects on the amounts and concentration of carbon, nitrogen, and phosphorus in grassland soils. *Agronomy Journal*, 1982, 74(5):831-835.
- [26] Don A, Schumacher J, Freibauer A. Impact of tropical land-use change on soil organic carbon stocks—a meta-analysis. *Global Change Biology*, 2011, 17(4):1658-1670.
- [27] 刘爽, 王传宽. 五种温带森林土壤微生物生物量碳氮的时空格局. *生态学报*, 2010, 30(12):3135-3143.
- [28] Chapin III F S, Matson P A, Vitousek P M. *Principles of Terrestrial Ecosystem Ecology*. 2nd ed. New York:Springer, 2011.
- [29] Meyfroidt P, Rudel T K, Lambin E F. Forest transitions, trade, and the global displacement of land use. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2010, 107(49):20917-20922.
- [30] Jobbágy E G, Jackson R B. The vertical distribution of soil organic carbon and its relation to climate and vegetation. *Ecological Applications*, 2000, 10(2):423-436.
- [31] Jobbágy E G, Jackson R B. The distribution of soil nutrients with depth: global patterns and the imprint of plants. *Biogeochemistry*, 2001, 53(1):51-77.
- [32] Meersmans J, Van Wesemael B, De Ridder F, Fallas Dotti M, De Baets S, Van Molle M. Changes in organic carbon distribution with depth in agricultural soils in northern Belgium, 1960-2006. *Global Change Biology*, 2009, 15(11):2739-2750.
- [33] Rumpel C, Kögel-Knabner I. Deep soil organic matter—a key but poorly understood component of terrestrial C cycle. *Plant and Soil*, 2011, 338(1/2):143-158.
- [34] Wang W J, Qiu L, Zu Y G, Su D X, An J, Wang H Y, Zheng G Y, Sun W, Chen X Q. Changes in soil organic carbon, nitrogen, pH and bulk density with the development of larch (*Larix gmelinii*) plantations in China. *Global Change Biology*, 2011, 17(8):2657-2676.
- [35] Sistla S A, Schimel J P. Stoichiometric flexibility as a regulator of carbon and nutrient cycling in terrestrial ecosystems under change. *New Phytologist*, 2012, 196(1):68-78.
- [36] Hamer U, Potthast K, Burneo J I, Makeschin F. Nutrient stocks and phosphorus fractions in mountain soils of Southern Ecuador after conversion of forest to pasture. *Biogeochemistry*, 2013, 112(1/3):495-510.
- [37] 杨金艳, 王传宽. 东北东部森林生态系统土壤碳贮量和碳通量. *生态学报*, 2005, 25(11):2875-2882.
- [38] 罗亚勇, 张宇, 张静辉, 卡召加, 尚伦宇, 王少影. 不同退化阶段高寒草甸土壤化学计量特征. *生态学杂志*, 2012, 31(2):254-260.
- [39] 王建林, 钟志明, 王忠红, 陈宝雄, 余成群, 胡兴祥, 沈振西, 大次卓嘎, 张宪洲. 青藏高原高寒草原生态系统土壤氮磷比的分布特征. *应用生态学报*, 2013, 24(12):3399-3406.
- [40] 武小钢, 郭晋平, 田旭平, 杨秀云. 芦芽山亚高山草甸、云杉林土壤有机碳、全氮含量的小尺度空间异质性. *生态学报*, 2013, 33(24):7756-7764.
- [41] Koerselman W, Meuleman A F M. The vegetation N:P ratio: a new tool to detect the nature of nutrient limitation. *Journal of Applied Ecology*, 1996, 33(6):1441-1450.
- [42] Tessier J T, Raynal D J. Use of nitrogen to phosphorus ratios in plant tissue as an indicator of nutrient limitation and nitrogen saturation. *Journal of Applied Ecology*, 2003, 40(3):523-534.
- [43] Redfield A C. The biological control of chemical factors in the environment. *American Scientist*, 1958, 46(3):205-221.
- [44] Li H, Li J, He Y L, Li S J, Liang Z S, Peng C H, Polle A, Luo Z B. Changes in carbon, nutrients and stoichiometric relations under different soil depths, plant tissues and ages in black locust plantations. *Acta Physiologiae Plantarum*, 2013, 35(10):2951-2964.
- [45] Tischer A, Potthast K, Hamer U. Land-use and soil depth affect resource and microbial stoichiometry in a tropical mountain rainforest region of southern Ecuador. *Oecologia*, 2014, 175(1):375-393.