

DOI: 10.5846/stxb201803300691

靖磊, 周延, 吕偲, 赵君茹, 雷光春. 洞庭湖湿地 3 个林龄杨树人工林叶与土壤碳氮磷生态化学计量特征. 生态学报, 2018, 38(18): - .
Jing L, Zhou Y, Lu C, Zhao J R, Lei G C. Characterization of the soil and leaf C, N, and P stoichiometry of poplar plantations of three different stand ages in the Dongting Lake wetland, China. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(18): - .

洞庭湖湿地 3 个林龄杨树人工林叶与土壤碳氮磷生态化学计量特征

靖磊^{1,2}, 周延^{3,4}, 吕偲², 赵君茹¹, 雷光春^{2,*}

1 中南林业科技大学林学院, 长沙 410004

2 北京林业大学自然保护区学院, 北京 100083

3 南京林业大学南方现代林业协同创新中心, 南京 210037

4 南京林业大学生物与环境学院, 南京 210037

摘要: 选取洞庭湖洲滩湿地挖沟抬垄造林的 6 林龄、9 林龄和 13 林龄杨树人工纯林为研究对象, 通过比较不同林龄杨树叶及沟垄土壤的 C、N、P 含量差异, 研究湿地杨树人工林不同生长阶段养分元素的分配格局及生态化学计量学特征, 揭示杨树种植对洞庭湖湿地生态系统的影响。结果显示, 叶 N、叶 P 以及 C:P 和 N:P 与林龄显著相关, 但叶 C 和 C:N 与林龄不相关。3 个林龄杨树人工林叶 N:P 均大于 16, 说明 P 是限制洞庭湖杨树生长发育的主要因子, 9 林龄叶 P 量显著低于 6 林龄和 13 林龄, 而 N:P 和 C:P 则显著高于 6 林龄和 13 林龄, 说明 P 的限制在 9 林龄尤为显著。3 个林龄湿地杨树人工林树垄和树沟土壤有机 C、全 N 和 C:N 呈现出与林龄和土层深度的负相关关系, 但全 P 与两者没有显著关系。C:P 在树垄样地中呈现出与林龄和土层深度的负相关关系, 而在树沟样地中呈现出与土层深度的正相关关系, 与林龄无显著关系。N:P 在 9 林龄和 13 林龄树垄样地和 6 林龄树沟样地中与土层深度呈负相关关系, 说明挖沟抬垄造林方式不利于土壤有机 C 和全 N 的积累, 也不利于维持洞庭湖湿地土壤的肥力。

关键词: 生态化学计量; 洞庭湖湿地; 杨树人工林; 叶; 土壤

Characterization of the soil and leaf C, N, and P stoichiometry of poplar plantations of three different stand ages in the Dongting Lake wetland, China

JING Lei^{1,2}, ZHOU Yan^{3,4}, LU Cai², ZHAO Junru¹, LEI Guangchun^{2,*}

1 College of Forestry, Central South University of Forestry and Technology, Changsha 410004, China

2 School of conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China

3 Co-Innovation Center for Sustainable Forestry in Southern China, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, China

4 College of Biology and the Environment, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, China

Abstract: Ecological stoichiometry is a useful concept for studying the balance of multiple chemical elements in ecosystem interactions. In this study, we measured leaf and soil carbon (C), nitrogen (N), and phosphorus (P) levels in poplar plantation of three different stand ages (6-, 9-, and 13 year old), which were planted using the methods of digging furrows and lifting ridges, to explore the ecological stoichiometry characteristics and the distribution patterns of nutrient elements, and also to assess the ecological impacts of poplar plantations on the Dongting Lake wetland ecosystem. The results showed that stand age had a significant effect on leaf N, P, C:P and N:P ratios, but not significantly correlated with leaf C and C

基金项目: 湖南省教育厅项目 (15C1425); 中南林业科技大学青年基金项目 (QJ2012018B); 中南林业科技大学林学一级学科开放基金项目 (2016YB13)

收稿日期: 2018-03-30; **修订日期:** 2018-07-04

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: leiguangchunbjfu@gmail.com

: N ratio. For all three stand ages, the leaf N : P ratio was higher than 16, indicating that P is the main factor limiting the growth and development of poplar plantations in the Dongting Lake wetland. The content of P in 9-year-old leaves was significantly lower than that in 6-year-old and 13-year-old leaves, whereas the ratios of C : P and N : P in 9 year-old leaves were significantly higher than those in 6-year-old and 13-year-old leaves, which showed that the limit of P had a particularly marked effect on 9 year-old poplar plantations. In both the ridge and furrow plots of the wetland poplar plantations, soil organic carbon (SOC), total N (TN) and C : N ratio were negatively correlated with stand age and depth of the soil layer. In contrast, total P (TP) was not significantly correlated with these two factors. The C : P ratio in the ridge plots was negatively correlated with stand age and soil depth, in the furrow plots, this ratio was positively correlated with the soil layers rather than stand age. For the N : P ratio, we detected a negative correlation with soil depth in the 9-year-old and 13-year-old ridge plots and in the 6-year-old furrow plots. These results illustrate that the ridge and furrow method used for planting poplars is detrimental to the accumulation of SOC and TN and to the maintenance of soil fertility in the Dongting Lake wetland.

Key Words: ecological stoichiometry; Dongting Lake wetland; poplar plantation; leaf; soil

生态化学计量学用于探索生物的生命形式、生态系统结构及功能,与环境(水、土壤)和生物体的化学元素比率的关系,构建了分子水平的化学过程与生态系统水平的生态过程之间的联系^[1-2]。碳(C)、氮(N)和磷(P)是生物体组成的基本化学元素,在生物化学功能中具有很强的相互关系,是生态化学计量学中研究最多的三种元素^[3-4]。生态系统的地上(植物)和地下(土壤)部分紧密相连,两者之间的相互作用极大地影响着生态系统的过程和功能^[5-6],因此,对C、N、P等化学元素在植物和土壤系统中的时空变化特征的研究近年来得到了持续关注^[7-10]。

湿地是全球最重要的C库和N库之一,虽然仅占地表面积的5%—8%,却储存了整个陆地生态系统20%—25%的C和N^[11]。我国湿地的土壤C:N、C:P和N:P平均为18.22、245.22和13.60,均高于中国及世界土壤的平均值^[12]。然而,湿地是脆弱的生态系统,易受人类活动等干扰的影响,围垦等土地利用变化造成了湿地土壤中C:N和C:P比值的降低^[13]。造林是导致湿地利用变化的主要原因之一^[14],造林过程产生的扰动,导致了湿地土壤C和N含量的下降,使湿地由C库转变为C源^[15]。然而,现有文献大都聚焦于造林对湿地生态系统C、N含量的影响,而造林后,林分长时间大面积存在,阐明其自身生态化学计量学特征及变化规律,探究湿地杨树人工林养分元素的分配格局,对维持湿地生态系统的稳定有着十分重要影响,但相关研究却鲜有报道。

长江中下游是我国杨树速生丰产林的主要种植区域,湖南、湖北、安徽、江苏等省份的长江及其各级支流的滩地均有不同程度的开发种植,特别是位于洞庭湖西畔的西洞庭湖,杨树人工林已经占到了湖区总面积的30%,极大地改变了洞庭湖湿地的景观格局^[16]。由于受到湖区水文条件的限制,为了保证杨树种植的成活率,挖沟抬垄,将杨树种植于垄上是主要的造林方式,面积占比超过了90%^[17]。

本文在洞庭湖已有研究的基础上,以洞庭湖湿地3个林龄挖沟抬垄造林的杨树人工纯林为对象,探讨了湿地杨树人工林叶和土壤C、N、P元素生态化学计量特征及其随时间变化的规律,以期评估杨树种植对洞庭湖,乃至长江中下游地区湿地的生态影响提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究地概况

研究地湖南省西洞庭湖国家级自然保护区,位于洞庭湖西端,湖南省汉寿县境内,长江三口(松滋、虎渡和藕池)及沅江和澧水由此入洞庭湖,水文情势十分复杂。西洞庭湖是洞庭湖泥沙淤积最为严重,洲滩发育最为迅速的区域,“夏季湖相,冬季河相”在西洞庭湖尤为明显。西洞庭湖的洲滩开发主要分为两个阶段,第

一阶段是芦苇种植阶段,集中于 20 世纪 90 年代以前,湖内大部分可以利用的天然洲滩已被改造为芦苇滩地;第二阶段是 20 世纪 90 年代中期到本世纪初,以南方型黑杨(*Populus deltoides*)为主的杨树人工林在西洞庭湖迅速扩张,大面积地侵占了原有的芦苇滩地^[17]。杨树林下植物群落以水蓼(*Polygonum hydropiper* L.)、萎蒿(*Artemisia selengensis* Turcz. ex Bess.)、苔草属(*Carex* Linn.)、水芹(*Oenanthe javanica* (Bl.) DC.)等为主。

1.2 试验设计与采样

经前期预调查,杨树人工林林龄多在 15 年以下,近三年基本无新造林,因此本研究选取挖沟抬垄 6 年、9 年和 13 年杨树林地为研究对象,种植前均为芦苇滩地,立地条件相似(表 1)。野外样线布设及正式调查于 2015 年 9 至 10 月进行,于 3 个不同林龄的样地各设置 3 个 20 m×30 m 的大样方,在样方中选取标准木 5 株,采用高枝剪在林冠层分东西南北 4 个方向各取 1 个枝条,采集所有叶片并混合,每份不少于 300 g。在标准木下无干扰的树茎中部设置 1 m×1 m 的小样方,去除砾石和枯枝落叶后,按照 0—10 cm, 10—20 cm, 20—30 cm 三层取土,每份不少于 500 g;选择与树茎样方相邻的树沟底部,按相同方法和规格采集土壤样品。

表 1 洞庭湖采样点基本信息

Table 1 General information of sample plots

林龄 Ages	密度 Density /(株/hm ²)	垄高 Ridge height/m	垄宽 Ridge width/m	沟宽 Ditch width/m	胸径 Diameter breast height/cm	株高 Height/m	郁闭度 Canopy size/%
6	588±6	1.8	3.5	8.2	11.8±0.4	11.6±0.2	0.61±0.03
9	633±7	2.0	3.0	7.5	17.4±0.6	18.5±0.2	0.68±0.02
13	576±10	2.0	3.0	7.9	24.2±0.9	21.5±0.3	0.79±0.04

1.3 样品处理与测定

将采集的叶和土壤样品带回实验室,叶用烘箱于 85℃ 烘干至恒重,土壤放置于阴凉通风处自然风干。将所有样品磨碎,过 0.25 mm 筛,放置于干燥皿中保存待测。叶的 C、N、P 和土壤的有机 C、全 N、全 P 含量分别采用重铬酸钾氧化-外加热法;微量凯氏定氮法和碱熔-钼锑抗比色法测定^[18]。

1.4 数据分析

采用 SPSS 22.0 软件进行单因素方差检验(One-way ANOVA),显著性水平设置为 0.05;采用 Sigmaplot 12.5 软件制图。

2 结果与分析

2.1 杨树人工林叶 C、N、P 含量及生态化学计量学特征

图 1 表明,洞庭湖湿地 3 个林龄杨树人工林的叶 C 量在 389.46—409.27 g/kg 之间,叶 N 量在 19.80—21.10 g/kg 之间,叶 P 量在 0.92—1.09 g/kg 之间。不同林龄样地间的叶 C 和 N 量为 9 林龄大于 6 林龄和 13 林龄,而叶 P 量则相反,9 林龄小于 6 林龄和 13 林龄。C:N 的变化为 6 林龄小于 9 林龄,小于 13 林龄;C:P 和 N:P 的变化则表现为 9 林龄大于 6 林龄,大于 13 林龄。

表 2 表明,林龄对叶 N 和 P 量及 C:P 和 N:P 影响显著,但对叶 C 量和 C:N 的影响不显著。

表 2 林龄对叶 C、N、P 及其比值的单因素方差分析

Table 2 F and P value for the effects of stand ages on leaf C, N, P and mass ratios

因素 Factors	C	N	P	C:N	C:P	N:P
林龄 Stand ages	$F=0.7874$ $P=0.4970$	$F=34.14$ $P=0.005$	$F=6.868$ $P=0.0281$	$F=0.3356$ $P=0.7275$	$F=20.74$ $P=0.0020$	$F=10.55$ $P=0.0109$

2.2 湿地杨树人工林土壤有机 C、全 N 和全 P 含量

图 2 表明,洞庭湖湿地 3 个林龄杨树人工林土壤有机 C 含量变化范围在 4.61—13.02 g/kg 之间。相同林

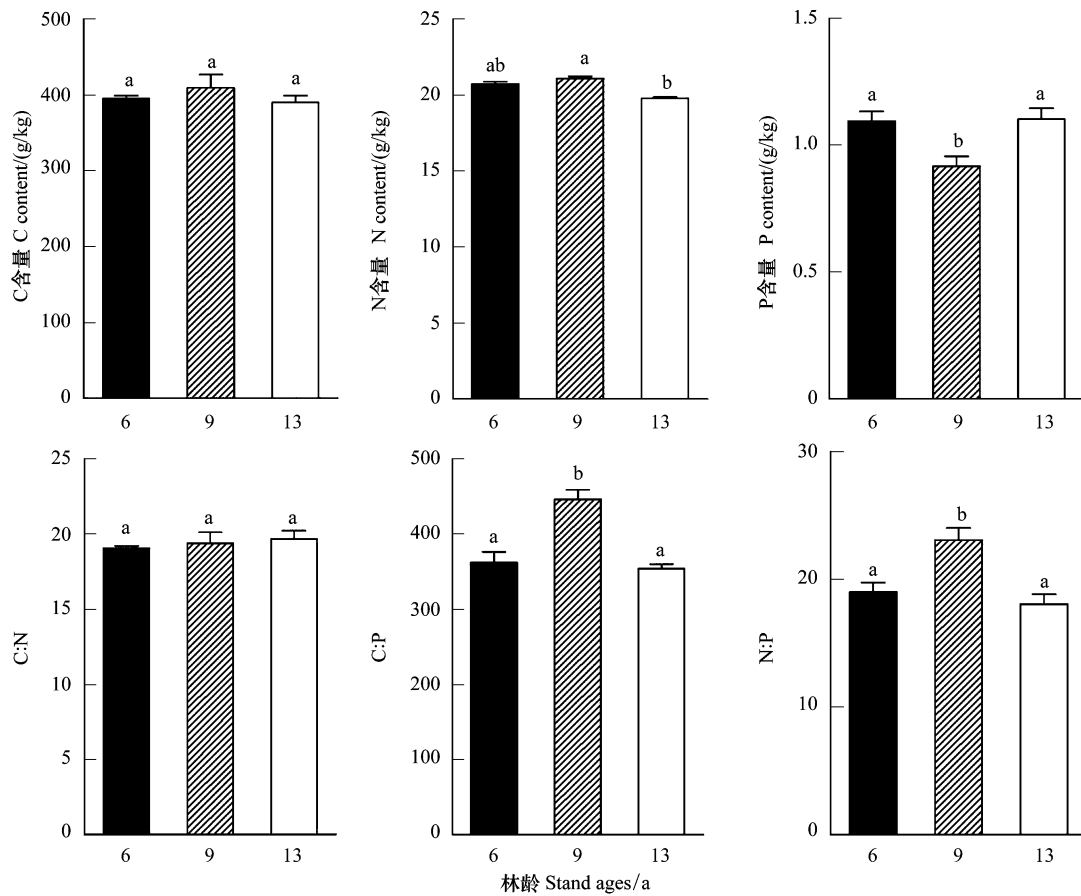


图1 3个林龄杨树人工林叶 C、N、P 含量及 C:N、C:P 和 N:P 生态化学特征

Fig.1 Contents of leaves C, N, P and C:N, C:P, N:P mass ratios in the three stand aged poplar plantations

字母不同表示存在显著性差异 ($P < 0.05$)

龄样地中,除 13 林龄树茎 20—30 cm 土层及 9 林龄树沟 20—30 cm 土层外,树茎和树沟土壤有机 C 含量随土层增加而降低;不同林龄样地中,除 9 林龄杨树样地的 20—30 cm 外,树茎和树沟同层土壤有机 C 含量随林龄增加而降低。洞庭湖湿地 3 个林龄杨树人工林土壤全 N 含量变化范围在 0.63—1.41 g/kg 之间。相同林龄样地中,除 13 林龄树茎 20—30 cm 及 6 林龄树沟 10—20 cm 土层外,树茎和树沟土壤全 N 含量随土层增加而降低;不同林龄样地中,除 13 林龄树茎 20—30 cm 及 9 林龄树沟 10—20 cm 土层外,树茎和树沟同层土壤全 N 含量 6 林龄和 9 林龄均高于 13 林龄。洞庭湖湿地 3 个林龄杨树林人工林土壤全 P 含量变化范围在 0.38—0.73 g/kg 之间。相同林龄样地中,除 6 林龄树沟 20—30 cm 土层外,树茎和树沟土壤全 P 含量随土层增加而降低;不同林龄样地中,除 9 林龄树沟 10—30 cm 土层外,树茎和树沟同层土壤全 P 含量随林龄增大而降低。

表 3 表明,林龄、土层和沟垄差异对湿地土壤有机 C、全 N 和全 P 含量影响显著;沟垄差异能对土壤有机 C 和全 N 含量显著影响,但对全 P 影响不显著。

2.3 湿地杨树人工林土壤 C、N、P 生态化学计量特征

图 3 表明,洞庭湖湿地 3 个林龄杨树人工林土壤 C:N 的变化范围在 6.79—10.72 之间,相同林龄样地中,树茎土壤 C:N 随土层增加先减小后增大,但增加幅度不相同,6 林龄和 13 林龄 0—10 cm 土层 C:N 高于 20—30 cm,而 9 林龄则相反。不同林龄样地中,树茎和树沟样地 C:N 随林龄增加而减小。洞庭湖湿地 3 个林龄杨树人工林土壤 C:P 的变化范围在 11.22—21.03 之间。相同林龄样地中,C:P 在树茎样地中随土层增加而减小,但在树沟样地中则随土层增加而增大;在不同林龄样地中,C:P 在树茎样地中随林龄增长而减小,在树沟样地中 C:P 则随林龄增加而增大。洞庭湖湿地 3 个林龄杨树人工林土壤 N:P 的变化范围在 1.40—2.52 之

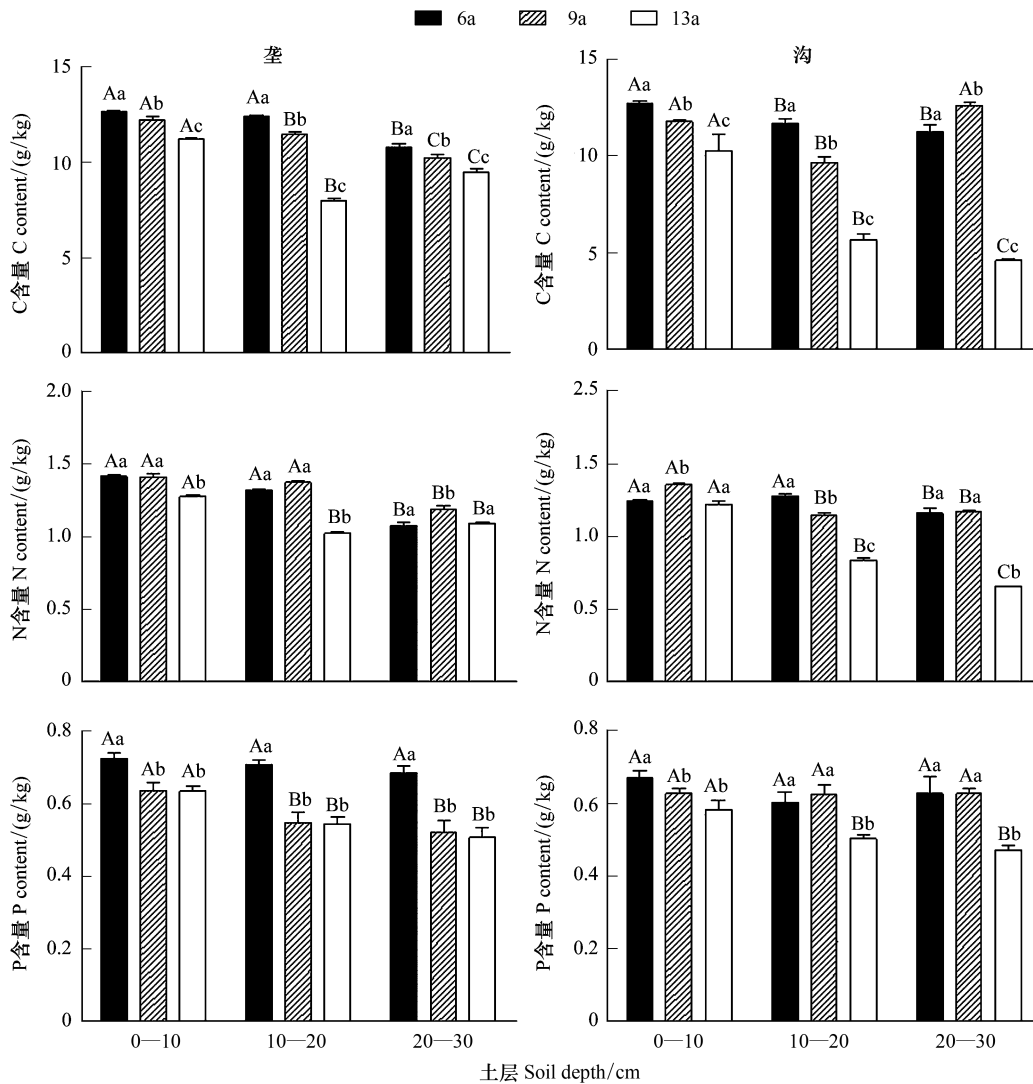


图 2 3 个林龄湿地杨树各土层土壤有机 C、全 N 和全 P 含量

Fig.2 Content of SOC, TN and TP of the various soil layers in the three stand aged poplar plantations

不同大写字母代表不同林龄间存在显著性差异 ($P < 0.05$), 不同小写字母代表不同土层间存在显著性差异 ($P < 0.05$)

间。相同林龄样地中, 6 林龄树垄与 9 林龄和 13 林龄树沟土壤 N:P 随土层增加而减小, 9 林龄树垄和 6 林龄树沟土壤全 P 含量随土层增加先增大后减小; 而 13 年树垄和 9 年树沟土壤全 P 含量则随土层增加先减小后增大。不同林龄样地中, 树垄同层土壤全 P 含量 9 林龄高于 13 林龄, 高于 6 林龄; 树沟同层土壤全 P 含量在 0—10 cm 土层, 6 林龄低于 9 林龄, 低于 13 林龄, 而在 10—30 cm 土层则相反, 6 林龄高于 9 林龄, 高于 13 林龄。

表 3 表明, 林龄和土层对土壤 C:N, C:P 和 N:P 影响显著, 垄和沟的差异对 C:P 和 N:P 影响显著, 但对 C:N 影响不显著。

2.4 洞庭湖湿地杨树人工林叶与土壤 C、N、P 及其比值的相关关系

图 4 表明, 随着叶 N 含量的增加, 土壤中全 N 含量呈显著增加趋势 ($R^2 = 0.4207, P < 0.01$), 但其他元素及比值之间相关性均不显著。

表 3 影响土壤 C、N、P 及其比值的环境因子因素方差分析

Table 3 F and P values for the effects of stand age, soil depth and location (ridge or furrow) on soil C, N, P and mass ratios

因素 Factors	C	N	P	C:N	C:P	N:P
林龄 Stand ages	$F=332.224$ $P=0.000$	$F=467.814$ $P=0.000$	$F=42.799$ $P=0.000$	$F=68.557$ $P=0.000$	$F=31.481$ $P=0.000$	$F=21.919$ $P=0.000$
土层 Soil depth	$F=110.537$ $P=0.000$	$F=408.322$ $P=0.000$	$F=15.269$ $P=0.000$	$F=17.970$ $P=0.000$	$F=5.922$ $P=0.000$	$F=7.932$ $P=0.000$
沟或垄 Ridge or Furrow	$F=53.972$ $P=0.000$	$F=258.908$ $P=0.000$	$F=2.554$ $P=0.119$	$F=0.152$ $P=0.698$	$F=10.321$ $P=0.003$	$F=18.948$ $P=0.000$

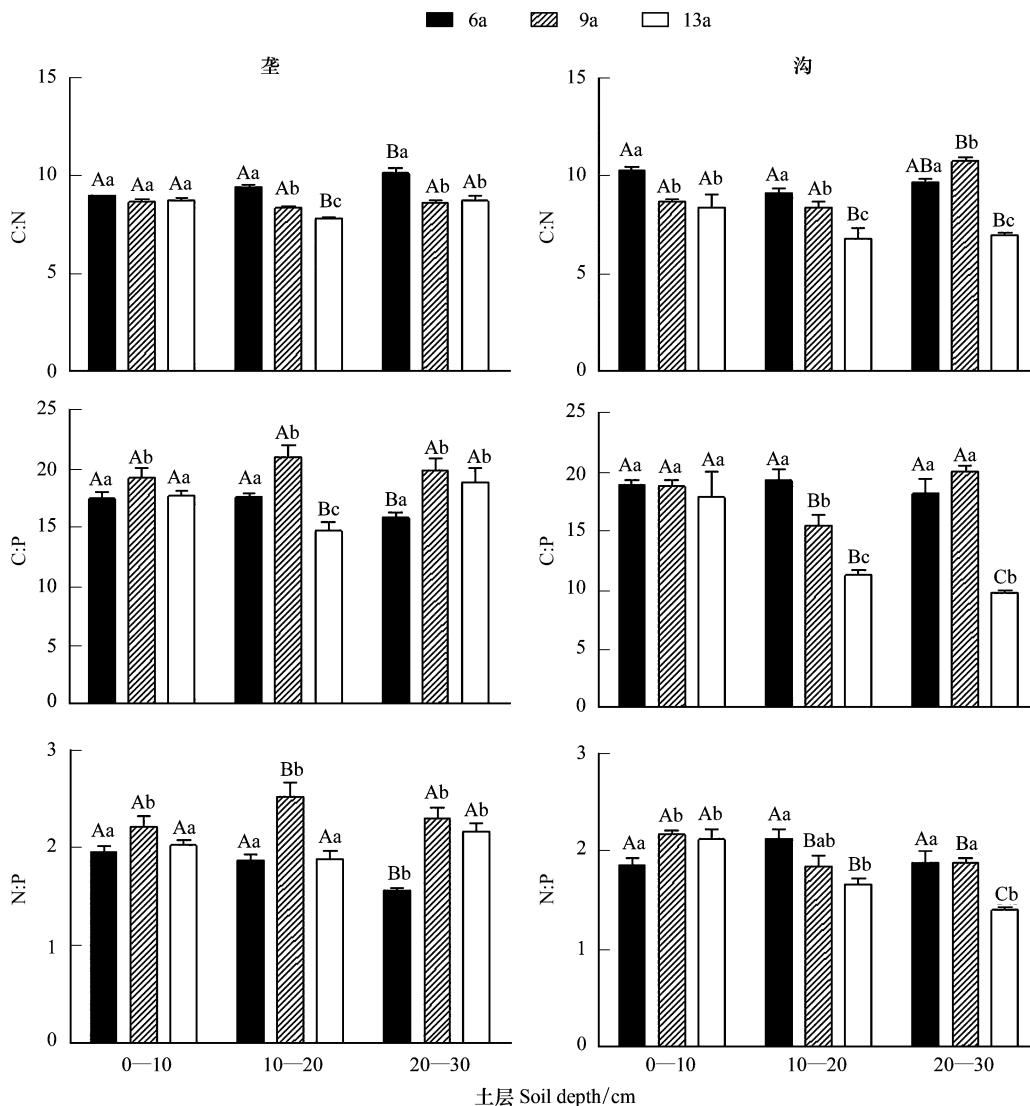


图 3 3 个林龄湿地杨树人工林土壤 C:N、C:P 和 N:P 变化特征

Fig.3 Change of soil C:N, C:P and N:P of the three stand aged poplar plantations

不同大写字母代表不同林龄间存在显著性差异 ($P<0.05$), 不同小写字母代表不同土层间存在显著性差异 ($P<0.05$)

3 讨论

3.1 林龄对洞庭湖湿地杨树人工林土壤 C、N、P 生态化学计量学特征的影响

研究结果显示, 3 个林龄的杨树人工林树垄和树沟样地土壤有机 C、全 N 和全 P 含量均随土层深度增加

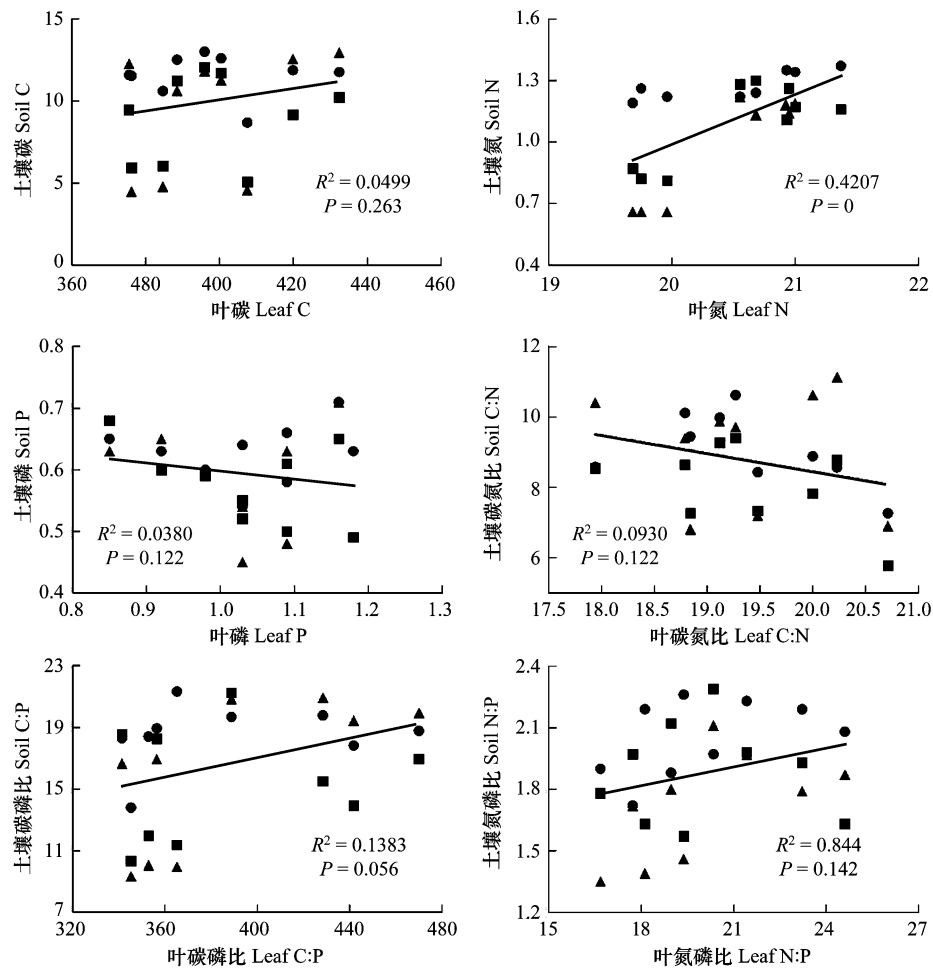


图 4 3 个林龄湿地杨树人工林叶和土壤 C、N、P 及其比值之间的关系

Fig.4 Relationship between leaves and soil C、N、P and mass ratios of the three stand aged poplar plantations

同一林龄的叶 C、N、P 及其比值对应沟和垄土壤的 3 个不同土层的对应指标

而降低。这与谢涛^[19]对苏北沿海不同林龄杨树人工林土壤活性有机 C 的研究结果一致,与李有志^[20]等在东洞庭湖研究杨树人工林对湿地土壤理化性质的研究结果相似。但相同类型样地中,树垄和树沟同层土壤有机 C、全 N 和全 P 含量均随林龄增大而降低,这一结果与以上研究则完全相反。在中幼林时期,杨树人工林土壤 C、N、P 含量有随林龄的增大而增加的趋势^[21],得益于凋落物和根系的分解释放了部分植物体的 C、N、P,使其重新返回土壤^[18]。然而就洞庭湖湿地而言,挖沟抬垄的造林方式,造成了原芦苇滩地土壤的严重搅动,深度的翻耕使得土壤中有机质充分暴露在了有氧环境中,分解加快,从而导致了更多的 C 和 N 等的排放。而且,这种方式降低了树垄土壤的含水量,造林后土壤有机质的积累速度也出现了下降^[22]。再者由于洞庭湖湿地特有的水文周期性变化,杨树的枯落物在夏季高水位时受到水流的冲刷,造成了一定比例的损失。并且,枯落物分解过程中产生的可溶性有机 C (Dissolved organic carbon, DOC) 等,也会进入水体,不利于营养物质向土壤中的迁移。树沟是树垄的深层次土壤,按照本文的研究趋势,树沟土壤有机 C 和全 N 含量应小于树垄,但实际上相同土层的元素含量树沟要大于树垄,进一步的方差分析也表明沟垄差异能显著影响三种元素含量,说明树沟的有机 C 和全 N 的流失速率低于树垄,这可能由于滩挖沟抬垄的造林方式没有将沟两端挖开,沟内环境相对独立,在洞庭湖秋季退水时,沟内水分无法一次性排空,与树垄相比形成了更长时间的厌氧环境,从而降低了有机质的分解速率。同时,这种沟垄设计,也使得树垄土壤中因雨水的冲刷和淋溶作用流失的 N 富集到了沟内,提高了树沟 N 的补给^[23]。

C:N 是土壤氮素矿化能力的标志,与土壤有机质分解速率成反比关系^[24],研究表明,除树垄 9 林龄 20—30 cm 土层,其余树垄和树沟的各层土壤 C:N 均为 6 林龄高于 9 林龄和 13 林龄,说明在研究期内,湿地杨树人工林不论树沟和树垄,土壤中有机质分解速率均随林龄的增大而加快,从而造成了土壤中 C 和 N 的流失,且 C 的流失速率要大于 N。本研究中土壤 C:P 和 N:P 的降低,主要是由于挖沟抬垄造林,使得有机 C 和全 N 含量随土层深度和林龄的增加而降低,而全 P 含量相对比较稳定所导致,虽然较低的 C:P 意味着生态系统中 P 的高效利用^[18],但并不意味着杨树人工林的种植能够增加湿地土壤 P 的活性,湿地土壤 P 矿化需要经过一系列的转化过程才能被植物利用,大量释放的可能性较小^[25]。本研究中,土壤中全 P 含量在 0.38—0.73 g/kg 之间,与其他湿地类型土壤相比,并没有明显增加^[26],不受沟垄及土壤深度的影响也说明了这一点。

与洞庭湖芦苇滩地相比^[27],3 个林龄杨树人工林的沟垄土壤有机 C 和全 N 含量的绝对值均较低,且同层含量均随林龄的增大而降低,说明挖沟抬垄的造林方式不利于土壤中有有机 C 和全 N 的积累,也不利于维持湿地土壤的肥力,并且树垄的影响要高于树沟。

3.2 洞庭湖湿地杨树人工林叶 C、N、P 生态化学计量学特征

本研究中,林龄对洞庭湖杨树人工林叶 C 没有显著影响,这与洞庭湖平原区杨树^[28],以及桉树和华北落叶松等其他树种的研究结果相似^[6,29]。同时,林龄对叶 N 和叶 P 以及 C:P 和 N:P 的影响显著,说明杨树叶的 C、N、P 生态化学计量特征存在明显的时间变异性,9 林龄叶 N 量显著高于 6 林龄和 13 林龄,而叶 P 量显著低于 6 林龄和 13 林龄,直接导致了 C:P 和 N:P 在林龄间的差异。N 和 P 是植物生长所必需的营养元素,但在自然界中,两者的供应往往受限,因此 N:P 的比值也可以用来表征环境对植物生长的养分供应状况^[30]。本研究中叶的 N:P 均大于 16,说明 P 是限制洞庭湖湿地杨树生长发育的主要元素^[31],与芦苇相同^[27],但与其他陆地森林生态系统多受 N 的限制不同^[29-30]。植物的营养主要来源于土壤,与土壤中对对应元素的含量密切相关^[30],相比其他森林类型土壤^[32],洞庭湖湿地杨树人工林土壤 P 含量偏小,说明湿地土壤 P 元素的相对匮乏对杨树人工林的生长发育起到了抑制作用,且对 9 林龄杨树人工林的抑制尤为显著。

叶片中的 C:N 和 C:P 能够表征植物的养分吸收效率及生长速率,较低的比值对应较高的生长速率^[33]。洞庭湖区杨树喜湿,蒸腾作用强度大,较好地适应了洞庭湖周期性干湿交替的环境特征,是典型的速生树种,10 年即可砍伐。与同纬度的浙江天童 32 种常绿阔叶树和低纬度的珠江三角洲常绿阔叶林、针叶林和针阔混交林 3 种森林类型相比,洞庭湖湿地杨树人工林的叶 C:N 和 C:P 均偏小^[34-35],说明该树种具有较高的生长速率,体现了其速生性。而与典型湿地植物芦苇的叶片相比,洞庭湖湿地杨树人工林叶 C:N, C:P 则偏大^[27],说明湿地原生植物的养分吸收效率要高于人工杨树林,对湿地环境更加适应。

环境因子能够显著影响营养元素在植物和土壤之间的迁移和转换^[36]。本文研究显示,叶的 C、N、P 及其之间的比值与土壤之间,除 N 以外,相关关系并不显著,这看似与其他森林类型的研究结果不一致^[29,30],但也恰恰说明,挖沟抬垄造林形成的湿地杨树人工林耦合生态系统,凸显了环境因子的复杂性和不确定性。就湿地而言,水是湿地最重要的影响因子,然而,水文情势的变化对杨树人工林 C、N、P 生态化学计量特征的影响目前还不清楚,需要进一步研究认证。

致谢:本研究在外业采样及样品分析过程中得到了湖南西洞庭湖保护区管理局及中南林业科技大学夏焱、蓝柏成及周瑛等同学的支持和帮助,在此一并感谢。

参考文献 (References):

- [1] Jiang P P, Chen Y M, Cao Y. C:N:P Stoichiometry and carbon storage in a naturally-regenerated secondary *Quercus variabilis* forest age sequence in the Qinling Mountains, China. *Forests*, 2017, 8(8): 281.
- [2] Liu J T, Gu Z J, Shao H B, Zhou F, Peng S Y. N-P stoichiometry in soil and leaves of *Pinus massoniana* forest at different stand ages in the subtropical soil erosion area of China. *Environmental Earth Sciences*, 2016, 75(14): 1091.
- [3] Ågren G I. Stoichiometry and nutrition of plant growth in natural communities. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, 2008, 39: 153-170.

- [4] Elser J J, Sterner R W, Gorokhova E, Fagan W F, Markow T A, Cotner J B, Harrison J F, Hobbie S E, Odell G M, Weider L J. Biological stoichiometry from genes to ecosystems. *Ecology Letters*, 2000, 3(6): 540-550.
- [5] Bardgett R D, Wardle D A. Herbivore-mediated linkages between aboveground and belowground communities. *Ecology*, 2003, 84(9): 2258-2268.
- [6] Fan H B, Wu J P, Liu W F, Yuan Y H, Hu L, Cai Q K. Linkages of plant and soil C:N:P stoichiometry and their relationships to forest growth in subtropical plantations. *Plant and Soil*, 2015, 392(1/2): 127-138.
- [7] 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.
- [8] Stahr S, Graf-Rosenfellner M, Klysubun W, Mikutta R, Prietzel J, Lang F. Phosphorus speciation and C:N:P stoichiometry of functional organic matter fractions in temperate forest soils. *Plant and Soil*, 2018, 427(1/2): 53-69.
- [9] Wang M, Moore T R, Talbot J, Richard P J H. The cascade of C:N:P stoichiometry in an ombrotrophic peatland: from plants to peat. *Environmental Research Letters*, 2014, 9(2): 024003.
- [10] 聂兰琴, 吴琴, 尧波, 付珊, 胡启武. 鄱阳湖湿地优势植物叶片-凋落物-土壤碳氮磷化学计量特征. *生态学报*, 2016, 36(7): 1898-1906.
- [11] Batjes N H. Total carbon and nitrogen in the soils of the world. *European Journal of Soil Science*, 1996, 47(2): 151-163.
- [12] 张仲胜, 吕宪国, 薛振山, 刘晓辉. 中国湿地土壤碳氮磷生态化学计量学特征研究. *土壤学报*, 2016, 53(5): 1160-1169.
- [13] Yang J S, Liu J S, Hu X J, Li X X, Wang Y, Li H Y. Changes of soil organic carbon, nitrogen and phosphorus concentrations under different land uses in marshes of Sanjiang Plain. *Acta Ecologica Sinica*, 2013, 33(6): 332-337.
- [14] Paavilainen E, Päivänen J. *Peatland Forestry: Ecology and Principles*. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 1995.
- [15] 马莉, 牟长城, 王彪, 张妍, 李娜. 排水造林对温带小兴安岭沼泽湿地碳源/汇的影响. *林业科学*, 2017, 53(10): 1-12.
- [16] 刘云珠, 史林鹭, 朵海瑞, 彭波勇, 吕偲, 朱轶, 雷光春. 人为干扰下西洞庭湖湿地景观格局变化及冬季水鸟的响应. *生物多样性*, 2013, 21(6): 666-676.
- [17] 靖磊, 吕偲, 周延, 左奥杰, 雷光春. 西洞庭湖湿地杨树人工林扩张的时空特征. *应用生态学报*, 2016, 27(7): 2039-2047.
- [18] 曹娟, 闫文德, 项文化, 谌小勇, 雷丕锋. 湖南会同 3 个林龄杉木人工林土壤碳、氮、磷化学计量特征. *林业科学*, 2015, 51(7): 1-8.
- [19] 谢涛. 苏北沿海不同林龄杨树人工林土壤有机碳特征[D]. 南京: 南京林业大学, 2012.
- [20] 李有志, 谢永宏, 李峰, 邹冬升. 洞庭湖湿地杨树人工林对土壤理化性质的影响. *农业现代化研究*, 2014, 35(2): 234-239.
- [21] 唐洁, 汤玉喜, 杨艳, 李永进, 吴敏. 洞庭湖区杨树人工林不同龄林土壤养分特征研究. *中国农学通报*, 2016, 32(25): 5-9.
- [22] Vicari R, Kandus P, Pratalongo P, Burghi M. Carbon budget alteration due to landcover-landuse change in wetlands: the case of afforestation in the Lower Delta of the Paraná River marshes (Argentina). *Water and Environment Journal*, 2011, 25(3): 378-386.
- [23] 杨丹, 项文化, 方晰, 樊纲惟, 许玉庆, 文丽, 邹丽梅. 石砾-青冈常绿阔叶林土壤有机碳和全氮空间变异特征. *生态学报*, 2014, 34(12): 3452-3462.
- [24] Don A, Schumacher J, Scherer-Lorenzen M, Scholten T, Schulze E D. Spatial and vertical variation of soil carbon at two grassland sites — Implications for measuring soil carbon stocks. *Geoderma*, 2007, 141: 272-282.
- [25] 秦胜金, 刘景双, 王国平, 王金达. 三江平原湿地土壤磷形态转化动态. *生态学报*, 2007, 27(9): 3844-3851.
- [26] 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*, 2011, 31(23): 7119-7124.
- [27] 靖磊. 洞庭湖湿地景观格局变化及其对植物多样性及土壤碳氮的影响[D]. 北京: 北京林业大学, 2017.
- [28] 蔡洁. 洞庭湖区杨树人工林生物生产力与碳储量研究[D]. 长沙: 中南林业科技大学, 2010.
- [29] 牛瑞龙, 高星, 徐福利, 王渭玲, 王玲玲, 孙鹏跃, 白小芳. 秦岭中幼林龄华北落叶松针叶与土壤的碳氮磷生态化学计量特征. *生态学报*, 2016, 36(22): 7384-7392.
- [30] 刘万德, 苏建荣, 李帅锋, 张志钧, 李忠文. 云南普洱季风常绿阔叶林演替系列植物和土壤 C、N、P 化学计量特征. *生态学报*, 2010, 30(23): 6581-6590.
- [31] 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.
- [32] 张泰东, 王传宽, 张全智. 帽儿山 5 种林型土壤碳氮磷化学计量关系的垂直变化. *应用生态学报*, 2017, 28(10): 3135-3143.
- [33] Elser J J, Acharya K, Kyle M, Cotner J, Makino W, Markow T, Watts T, Hobbie S, Fagan W, Schade J, Hood J, Sterner R W. Growth rate-stoichiometry couplings in diverse biota. *Ecology Letters*, 2003, 6(10): 936-943.
- [34] 黄建军, 王希华. 浙江天童 32 种常绿阔叶树叶片的营养及结构特征. *华东师范大学学报: 自然科学版*, 2003, (1): 92-97.
- [35] 吴统贵, 陈步峰, 肖以华, 潘勇军, 陈勇, 萧江华. 珠江三角洲 3 种典型森林类型乔木叶片生态化学计量学. *植物生态学报*, 2010, 34(1): 58-63.
- [36] Bardgett R D, Wardle D A. *Aboveground-Belowground Linkages*. Oxford: Oxford University Press, 2010.