DOI: 10.5846/stxb201311282837

夏江宝, 陈印平, 王贵霞,任加云.黄河三角洲盐碱地不同造林模式下的土壤碳氮分布特征.生态学报,2015,35(14):4633-4641.

Xia J B, Chen Y P, Wang G X, Ren J Y.Distribution characteristics of soil carbon and nitrogen under different afforestation modes of saline land in the Yellow River Delta.Acta Ecologica Sinica,2015,35(14):4633-4641.

黄河三角洲盐碱地不同造林模式下的土壤碳氮分布特征

夏江宝[1], 陈印平[1,*], 王贵霞[2], 任加云[1]

1 滨州学院山东省黄河三角洲生态环境重点实验室, 滨州 256603

2 滨州市水利局, 滨州 256600

摘要:为了探讨不同造林模式对土壤碳氮影响的生态效应,以黄河三角洲盐碱地白蜡+棉花(FC)、香花槐+棉花(RC)、竹柳+棉花(SC)、白蜡林(F)、竹柳林(S)等 5 种造林模式为研究对象,分析比较各造林模式土壤的碳氮形态及分布特征,为重度退化刺槐林的经营改造和造林模式选择提供理论依据。结果显示:(1)不同造林模式下土壤的可溶性总碳和可溶性有机碳含量均高于裸地,农林间作高于纯林,其中 SC 模式含量最高,其次为 FC 和 RC 模式,而 F 和 S 纯林模式较低;5 种造林模式不同土层可溶性有机碳含量均表现为 0—20 cm 高于 20—40 cm。(2)农林间作模式 0—40 cm 土层的可溶性全氮和可溶性有机氮平均含量均高于纯林模式,其中 SC 模式的含量最高。FC、SC 和 S 纯林模式 0—20 cm 土层可溶性有机氮含量显著高于 20—40 cm 土层,分别为其 1.4、1.5 和 2.7 倍;而 RC 模式 20—40 cm 土层可溶性有机氮含量显著高于 0—20 cm 土层。(3)5 种造林模式中,除 F 纯林土壤硝态氮低于裸地外,其他造林模式下的土壤各种氮养分含量均显著高于裸地。土壤可溶性有机碳与全氮和铵态氮的相关性达到极显著水平($P<0.01$)。研究表明农林间作模式可显著提高重度退化刺槐林皆伐后土壤中有效态碳、氮含量,其中 SC 模式改良效果较好,而纯林模式较差。

关键词:黄河三角洲; 盐碱地; 造林模式; 土壤碳含量; 土壤氮含量

Distribution characteristics of soil carbon and nitrogen under different afforestation modes of saline land in the Yellow River Delta

XIA Jiangbao[1], CHEN Yinping[1,*], WANG Guixia[2], REN Jiayun[1]

1 *Binzhou University, Shandong Provincial Key Laboratory of Eco-Environmental Science for Yellow River Delta, Binzhou* 256603, *China*

2 *Water Conservancy Bureau of Binzhou, Binzhou* 256600, *China*

Abstract: The Yellow River Delta is the largest estuarine wetland ecosystem in the warm temperate zone of in China and the most active land-ocean interacion regions among the large river deltas in the word. However, here rainfall was less and the mineral content in underground water was higher. These conditions caused soil salinization and alkalization. Soil affected by saline and alkaline constitute nearly 50 percent of total and surface. Therefore, the development of management strategies designed to reduce soil salinity has become a high priority in this region. However, a better understanding of ecological effects of different afforestation is necessary before targeted management strategies can be conceived. Thus, the objective of this study is to assess the effects of agro-forestry and pure forest on the organic carbon and nitrogen of saline soil in the Yellow River Delta. Total soluble carbon (TOC), dissolved organic carbon (DOC), total soluble nitrogen (TSN), soluble

基金项目:国家自然科学基金项目(31370702); 国家"十一五"科技支撑计划项目(2009BADB2B0502); 山东省高校科研发展计划项目(J13LE58, J13LC03); 山东省科技发展计划项目(2013YD17001)

收稿日期:2013-11-28; **网络出版日期**:2014-09-09

* 通讯作者 Corresponding author.E-mail: yinpchen@126.com

organic nitrogen (SON), NH_4^+-N, NO_3-N and total nigrogen (TN) in soil taken from different afforest measures were analyzed. Five afforestation models were *Fraxinus chinensis* + *Gossypium hirsutum* (FC), *Robinia pseudoacacia* cv. *Idaho* + *Gossypium hirsutum* (RC), *Salix babylonica* + *Gossypium hirsutum* (SC), *Fraxinus chinensis* (F) and *Salix babylonica* (S). Compared with bare land, soil TOC and DOC contents in the combination of SC were highest among all treatments, followed by FC, RC, Soil DOC content in all systems tended to be higher in surface layer (0—20 cm) than in deeper layer (20—40 cm). Regardless of soil layers, the contents of TSN and SON were higher in agro-forestry than in pure forest, SC had the highest level of soil TSN and SON. The contents of SON in 0—20 cm soil layers were significantly higher than 20—40 cm soil layers under FC, SC and S, respectively was 1.4, 1.5 and 2.7 times of them. Conversely, the contents of soil SON in 20—40 cm were significantly higher than in 0—20 cm under RC. Among five afforestation measures, the contents of all kinds of soil nitrogen were significantly higher than bare land, excepted for the lower NO_3^--N contents under F. There was a positive correlation between the DOC, and TN and NH_4^+-N ($P<0.01$). The conclusion indicates that the agro-forestry could significantly improve the contents of soil effective carbon and nitrogen, in particular, SC was the best afforestation model, while the pure forest was poor.

Key Words: Yellow River Delta; saline land; afforestation model; soil carbon content; soil nitrogen content

土壤有机碳和氮素是土壤养分的重要组成部分。土壤含碳量在很大程度上依赖于地表植被和土地利用状况[1-3],同时土壤有机碳含量的变化会影响植物对水分和营养元素的吸收,进而影响生物生产力[4-6]。氮是调节陆地生态系统生产量、结构和功能的关键性元素,能够限制群落初级和次级生产量[6-8],而且不同的土地利用方式容易引起土壤氮循环格局的变化,从而影响整个生态系统的稳定性和可持续性[6,9-10]。盐碱生境下,土壤养分转化及动态调节能力随植被类型的不同,在时间和空间上表现出较大差异[2,11-13]。滨海盐碱非耕地具有较大的固碳潜力,随原生植被群落的演替,土壤有机碳及微生物量碳增加显著,并且主要分布在土壤表层[13];随着退化演替的进行,盐碱化草地土壤有机碳含量呈现出先升高再降低的趋势,特别是 0—40 cm 土层变化显著[12]。盐碱生境对滨海芦苇湿地氮活性组分影响较大[14],盐碱化土壤可溶性有机碳、土壤可溶性氮与土壤速效养分和含盐量密切相关[15]。土壤盐碱化是黄河三角洲地区农林业发展的主要限制因子,特别是受地下水埋深浅、矿化度高及蒸降比大等自然条件的制约和人为活动的干扰,黄河三角洲盐碱地植被覆盖率较低,防护林树木种类少,防护林体系结构较简单,功能低且不稳定,而盐碱生境下的土壤养分转化在一定程度上影响着树木生长和土壤生产力。因此,探明盐碱生境下,不同造林模式土壤的碳、氮组分变化有助于了解土壤固碳机理和土壤有机氮的变化机制,对林分生长与地力维持具有较大意义。

刺槐(*Robinia pseucdoacacia*)是黄河三角洲滨海盐碱地的主要防护林树种,但是由于林地蒸降比较大、淡水资源缺乏及土壤盐碱化,刺槐林出现了枯梢、断头等退化现象[16-17]。依据树木形态及土壤理化指标,黄河三角洲退化人工刺槐林可分为生长潜力型、轻度低效型,中度、极度和重度低质低效型等 5 种类型,其中极度低质低效型和重度低质低效型刺槐林的经营改造措施主要为全面皆伐后进行不同造林模式的营建[16];作为木本肥料的刺槐林,随着退化程度的加剧,刺槐林的固氮作用和改良土壤效应在减弱[16-17],而不同模式的农林间作和不同树种的纯林栽植是该区域主要的经营改造措施。目前关于黄河三角洲盐碱地植被类型与土壤碳氮特性的研究,主要以不同林分类型的土壤改良效应为主[10,15,18],缺少不同造林模式下土壤碳、氮含量特征及其转化规律方面的报道,致使黄河三角洲盐碱地重度退化刺槐林皆伐后的不同造林模式如何影响碳氮组分及交互作用尚不明确。因此,本文以黄河三角洲盐碱地重度退化刺槐林皆伐后的不同造林模式为研究对象,测定分析不同改造模式下的土壤可溶性碳、氮形态及其含量,阐明不同造林模式对土壤碳、氮分布的影响规律,为黄河三角洲重度退化刺槐林皆伐后的造林模式选择和树种配置提供理论依据和技术参考。

1　材料与方法

1.1　研究地概况

研究地点位于山东省东营市河口区的黄河三角洲军马场生产基地(118°31′—120°18′E,37°55′—38°16′N),属于暖温带半湿润大陆性季风气候区。该区域四季温差明显,年平均气温为 11.6—12.5 ℃,极端年份最高气温为 41.9 ℃,极端最低气温为-23.3 ℃;年平均日照时数为 2590—2830 h;无霜期 211 d;年均降水量为 530—630 mm,其中 70%分布在夏季;平均蒸散量为 750—2400 mm。重度退化刺槐林主要为黄河故道附近的 38 年生刺槐林,主要特征是树龄较大,树木死亡及中度、重度枯梢严重,丧失自然更新能力[16-17]。试验区土壤由冲积性黄土母质在海浸母质上沉淀而形成,机械组成以粉沙为主,沙粒粘粒相间分布,具有复杂的层次变化。试验区主要造林模式有白蜡(*Fraxinus chinensis*)林、刺槐(*Robinia pseudoacacia*)林、柽柳(*Tamarix chinensis*)林、杨树(*Populus euramericana*)林等。天然植被以盐生、湿生的禾本科芦苇(*Phragmites communis*)、茅草(*Imperata cylindrica*)和翅碱蓬(*Suaeda heteroptera Kitagawa*)等为主。

1.2　研究方法

1.2.1　造林模式的选取

白蜡、竹柳(*Salix babylonica*)和香花槐(*Robinia pseudoacacia* cv. *idaho*)是黄河三角洲盐碱区域栽植的主要树种,具有较好的耐盐能力和降盐改土功能。在黄河三角洲盐碱地重度退化刺槐林皆伐后实施恢复造林的林地中,选取由不同树种组成的 5 种造林模式,树龄均为 6 年生,其中农林间作模式为:白蜡+棉花(*Gossypium hirsutum*)、香花槐+棉花和竹柳+棉花,3 种农林间作模式的林下植被总盖度分别为:85%,89%和 93%,林分密度为单位面积上树木株数。纯林模式为白蜡纯林和竹柳纯林,林下植被总盖度分别为 75%和 72%。同时以相同地段的裸地(CK)作为对照,植被总盖度为 20%。3 种农林间作模式,在棉花种植前深耕翻地,初花期追肥 1 次,其他造林模式不进行肥水管理。不同造林模式下,林分基本概况见表 1。

表 1　不同造林模式下林分基本概况

Table 1　The basic conditions of different afforestation modes

造林模式 Afforestation mode	林分密度 Stand density/(株/hm^2)	平均胸径 Average DBH/cm	平均树高 Average height/m	郁闭度 Canopy density
FC	740	8.8	7.7	0.45
RC	580	7.0	6.5	0.55
SC	430	15.0	11.2	0.70
F	1480	8.7	6.9	0.52
S	1450	18.0	8.2	0.65

FC: 白蜡+棉花 *Fraxinus chinensis* + *Gossypium hirsutum*,RC: 香花槐+棉花 *Robinia pseudoacacia* cv. *Idaho* + *Gossypium hirsutum*,SC: 竹柳+棉花 *Salix babylonica* + *Gossypium hirsutum*,F: 白蜡林 *Fraxinus chinensis*,S: 竹柳林 *Salix babylonica*,CK: 裸地对照 Compared with bare land

1.2.2　土壤样品的采集

在每种造林模式下分别设置 3 个 20 m×20 m 的样地,按“S”型布设 5 个取样点,分别在 0—20 cm,20—40 cm 的土层两种深度进行土壤样品的采样,将相同土层样品混合,低温保鲜带回实验室。部分风干后过 0.25 mm 筛,分析测定土壤的全 N;另一部分土壤样品在过 2 mm 筛后于 4℃下保存,用于测定可溶性总碳(TOC)和可溶性有机碳(DOC);以及硝态氮(NO_3^--N)、铵态氮(NH_4^+-N)、可溶性全氮(TSN)、可溶性无机氮(Soluble inorganic nitrogen SIN)、总氮(TN)和可溶性有机氮(SON)。

1.2.3　测定指标及测定方法

土壤 TN 采用元素分析仪测定(Element Vario EL III,Germany)。NO_3^--N 和 NH_4^+-N 的测定方法是:先将土壤样品用 2 mol/L KCl 溶液作为浸提剂(土水比为 1∶5),室温振荡 30 min,离心过滤,然后用连续流动注射分析仪(Seal autoanalyzer 3,Germany)分析测定浸提液。可溶性无机氮 SIN 的含量是 NO_3^--N 和 NH_4^+-N 含量之

和。可溶性总碳(TOC)、DOC 与 TSN 的测定:土壤样品先采用 0.5 mol/L K_2SO_4溶液浸提,4500 r/min 离心 10 min,上清液经 0.45 μm 微孔膜过滤,然后采用有机碳分析仪(Vario TOC,Germany)测定;可溶性有机氮 SON 含量是可溶性总氮和可溶性无机氮含量之差。

1.2.4 数据分析与处理

所有数据的统计分析采用 Excel 2003 与 SPSS 13.0 软件进行单因素方差分析(ANOVA)和相关性分析。

2 结果与分析

2.1 不同造林模式土壤可溶性总碳和有机碳的含量

不同造林模式下 0—40 cm 土壤可溶性总碳含量均高于裸地,总体表现为竹柳+棉花可溶性总碳含量最高,其次是白蜡+棉花,而白蜡、竹柳纯林和香花槐+棉花农林间作模式差异不大,均值在 6.39—6.42 g/kg 之间(图 1)。在土壤垂直层次上,竹柳+棉花,白蜡+棉花农林间作模式和竹柳纯林模式可溶性总碳含量表层稍高于 20—40 cm 土层,各造林模式的土壤上下层可溶性总碳含量差异不显著($P>0.05$);而香花槐+棉花和白蜡纯林土壤表层可溶性总碳含量则显著低于 20—40 cm 土层($P<0.05$)(图 1)。

不同造林模式下土壤可溶性有机碳含量均高于裸地(图 2),0—40 cm 土层中可溶性有机碳含量均值大小依次为竹柳+棉花>白蜡+棉花>香花槐+棉花>白蜡纯林>竹柳纯林,与裸地相比,分别增加 169.4%、165.5%、106.6%、98.8%和 60.0%。在土壤垂直层次上,除竹柳纯林模式外,其他造林模式下的土壤可溶性有机碳含量表现为:0—20 cm 高于 20—40 cm 土层,平均含量在 34.63—101.63 mg/kg 之间。在垂直方向上,裸地可溶性有机碳含量的变化幅度最小,白蜡+棉花造林模式下 20—40 cm 土层中的可溶性有机碳含量下降幅度最大,其次为香花槐+棉花。竹柳纯林模式下的土壤可溶性有机碳在 20—40 cm 土层中的含量却高于 0—20 cm 土层,这可能是竹柳是深根系植物,主根很深,侧根和须根分布于各土层中,大量死根的腐解为土壤提供了丰富的碳源[19-20],因此,竹柳纯林 20—40 cm 土壤可溶性有机碳含量显著高于浅层土壤。

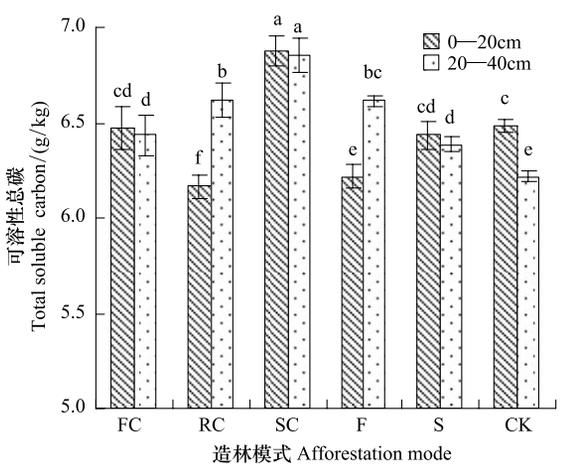


图 1 不同造林模式土壤可溶性总碳的垂直分布

Fig.1 Vertical distribution of soil total soluble carbon in different afforestation mode

标有不同小写字母的数值表示差异显著($P<0.05$)

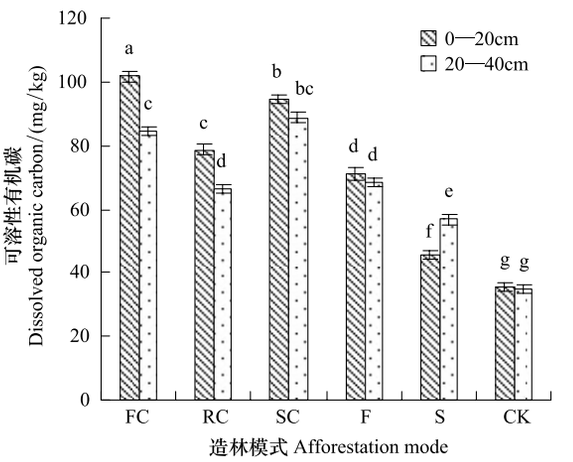


图 2 不同造林模式土壤可溶性有机碳的垂直分布

Fig.2 Vertical distribution of soil dissolved organic carbon in different afforestation mode

2.2 不同造林模式土壤可溶性总氮和有机氮的含量

由图 3 可以看出,不同造林模式下 0—40 cm 土壤可溶性总氮平均含量均高于裸地,平均值在 26.56—40.22 mg/kg 之间。农林间作模式下的土壤可溶性总氮含量高于纯林模式,竹柳+棉花可溶性总氮含量最高,其次为白蜡+棉花,香花槐+棉花,而竹柳和白蜡纯林含量较低。在土壤垂直层次上,白蜡+棉花,竹柳+棉花 2

种农林间作模式和竹柳纯林模式,0—20 cm 土壤可溶性总氮含量显著高于 20—40 cm 土层($P<0.05$),而香花槐+棉花,白蜡纯林则表现出相反的变化趋势。

不同造林模式下 0—40 cm 土壤的可溶性有机氮平均含量均高于裸地(图 4),并且农林间作模式高于纯林模式,竹柳+棉花,香花槐+棉花,白蜡+棉花,白蜡和竹柳纯林土壤可溶性有机氮平均值在 14.87—24.11 mg/kg 之间,分别是裸地的 2.21,1.95,1.82,1.39 和 1.36 倍。从土壤垂直结构来看,5 种造林模式 0—20 cm 土壤可溶性有机氮含量差异显著($P<0.05$),其中竹柳+棉花的可溶性有机氮含量最高(29.23 mg/kg),其次为:白蜡+棉花>竹柳纯林>香花槐+棉花>白蜡纯林>裸地,分别较裸地增加 173.9%、117.4%、102.9%、59.7% 和 40.9%。在 20—40 cm 土层中,香花槐+棉花的可溶性有机氮含量最高(25.52 mg/kg),与其他造林模式土壤可溶性有机氮含量存在显著性差异($P<0.05$),而白蜡+棉花与竹柳+棉花、竹柳+棉花与白蜡纯林之间差异不显著($P>0.05$)。同一种造林模式下,白蜡+棉花、竹柳+棉花和竹柳纯林 0—20 cm 土壤可溶性有机氮含量显著高于 20—40 cm 土壤,分别是下层的 1.4、1.5 和 2.7 倍;而香花槐+棉花 20—40 cm 土壤可溶性有机氮含量显著高于 0—20 cm;随土层加深白蜡纯林可溶性有机氮含量差异不显著($P>0.05$),可能是种植棉花施用化肥,导致土壤可溶性有机氮含量普遍较高。

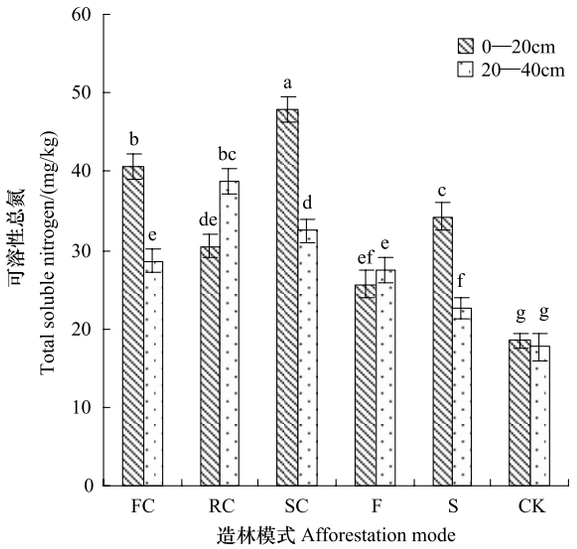


图 3　不同造林模式土壤可溶性总氮的垂直分布

Fig.3　Vertical distribution of soil total soluble nitrogen in different afforestation mode

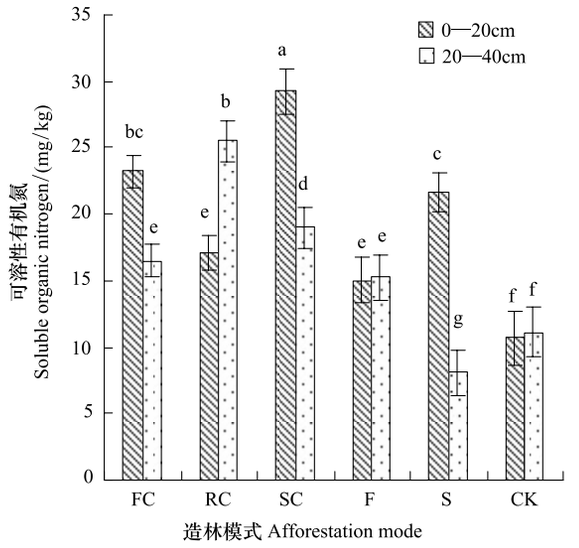


图 4　不同造林模式土壤可溶性有机氮的垂直分布

Fig.4　Vertical distribution of soil soluble organic nitrogen in different afforestation mode

2.3　不同造林模式土壤中不同形态的氮含量

由表 2 可知,5 种造林模式下土壤铵态氮含量较硝态氮高,其中,竹柳+棉花 0—20 cm 层土壤可溶性无机氮和总氮含量最高,分别为 18.66 mg/kg 和 0.54 g/kg。0—40 cm 土壤层可溶性有机氮占可溶性全氮的百分比范围为 52.3%—61.6%,其中香花槐+棉花所占百分比最高,为 61.6%,其次为竹柳+棉花(59.9%),而白蜡+棉花和白蜡纯林比较相近(57%),竹柳纯林最低仅为 52.3%。不同造林模式下,土壤可溶性有机氮占可溶性总氮的含量在 50%以上,表明可溶性有机氮是土壤可溶性氮的主要组成部分。可溶性无机氮占可溶性全氮平均百分比范围为 38.4%—47.7%,竹柳纯林所占百分比最高(47.7%),其次为白蜡+棉花,白蜡纯林,而香花槐+棉花最低,仅为 37.4%。可溶性全氮占总氮的平均百分比范围为 7.5%—8.9%,平均为 8.2%,其中农林间作模式相对较高,均值在 8.4%—8.9%之间,而白蜡和竹柳纯林模式较低,分别为 7.6% 和 7.5%。

表 2 不同造林模式土壤中各形态氮的含量

Table 2 The content of soil nitrogen in different afforestation modes

造林模式 Afforestation mode	土层 Soil layer/cm	铵态氮 NH_4^+-N/(mg/kg)	硝态氮 NO_3^-N/(mg/kg)	可溶性无机氮 Soluble inorganic N/(mg/kg)	全氮 Total N /(g/kg)	可溶性无机氮/可溶性全氮 Soluble inorganic N/total soluble N/%	可溶性有机氮/可溶性全氮 Soluble organic N/total soluble N /%	可溶性全氮/全氮 Total soluble N / total N/%
FC	0—20	10.69b	6.76b	17.45a	0.45ab	42.93c	57.07e	9.03ab
	20—40	8.75d	3.41ef	12.16bc	0.37bcd	42.46cd	57.54e	7.74de
RC	0—20	8.54d	4.91cd	13.45bc	0.35bcd	44.11b	55.89f	8.71abcd
	20—40	9.51c	3.61ef	13.12bc	0.42abc	33.95h	66.05a	9.20a
SC	0—20	12.35a	6.31b	18.66a	0.54a	38.96e	61.04c	8.87abc
	20—40	10.67b	2.89f	13.56bc	0.41abcd	41.67d	58.33d	7.94cde
F	0—20	7.52e	3.12f	10.64d	0.32bcd	41.45d	58.55d	8.02 bcde
	20—40	7.54e	4.63cd	12.17cd	0.38bcd	44.34b	55.66f	7.22ef
S	0—20	7.54e	5.02c	12.56c	0.41abcd	36.71f	63.29b	8.34abcde
	20—40	6.52f	8.04a	14.56b	0.35bcd	64.28a	35.72h	6.47fh
CK	0—20	4.12g	3.66ef	7.78e	0.28d	42.17cd	57.83de	6.59fh
	20—40	2.43h	4.11de	6.54e	0.31cd	37.07f	63.10b	5.69h

同一列中标有不同小写字母的数值表示差异显著(P<0. 05)

3 讨论

3.1 不同造林模式土壤碳氮含量的变化特征

土壤可溶性有机碳和可溶性有机氮是森林生态系统中土壤活性碳、氮库的重要组成部分,它们在生态系统中的流动和转移构成了生态系统 C、N 循环的重要组成部分[5-6,8],也对森林土壤枯枝落叶层和土壤层有机 C、N 库的源汇功能有着重要影响[12,21-22]。盐碱生境下,土壤熟化程度低,植物生长缓慢,植被覆盖少,限制了土壤有效碳氮的输入和积累,而种植具有降盐改土功能的植被,是提高盐碱生境植物生物量和增加土壤养分输入的主要方式[15-16, 23]。

土壤可溶性有机碳对土地利用方式的响应较敏感[23],土壤有机质中的腐殖质是土壤可溶性有机碳的主要来源,也是土壤微生物可直接利用的有机碳源。黄河三角洲轻度盐渍化土壤条件下,粮田和菜地土壤可溶性有机碳和有机氮含量最高,分别为 128.2 mg/kg 和 86.6 mg/kg[23],盐碱地刺槐+臭椿(*Ailanthus altissima*)混交林分别为 257.70 mg/kg 和 55.80 mg/kg[15],远高于该研究的不同造林模式,这可能与粮田和菜地的施入肥料,混交林造林时间较长,改变了生产系统土壤的养分供应能力有关。本研究结果表明,不同造林模式土壤可溶性有机碳和可溶性有机氮含量显著高于裸地土壤(P<0.05),可能是因为可溶性有机碳和可溶性有机氮主要来源于植物的凋落物和土壤有机物的矿化过程[24],土壤微生物及植物根系的分泌物也是其重要来源[25],农林间作模式下植物凋落物丰富、土壤生物活性高。与土壤中的非活性碳素相比,可溶性有机碳具有周转速率快,活性强的特点,对地表覆盖、土地利用方式和管理措施及外界环境的变化(例如季节、温度、CO_2浓度、凋落物和降雨量)等因素较为敏感[23,26]。例如,竹柳+棉花农林间作模式下,竹柳生长迅速,生物量大,林下植被相对丰富,植被总盖度达 93%,地表凋落物和腐殖质层厚,利于土壤有机碳氮的转化和迁移;而单一纯林地在无外源肥料施加的情况下,由于成林时间短,林下覆盖度低,降盐改土能力弱,不利于凋落物的分解和营养元素的归还。而裸地的植物残余量回归更少,返回土壤的碳素少,因此,各造林模式下土壤可溶性有机碳和可溶性有机氮的含量显著高于裸地。黄河三角洲盐碱地不同林型下,土壤可溶性有机碳和可溶性总氮多表现为腐殖质层>0—20 cm 土层>20—40 cm 土层[15],这与该研究结果类似,表明土壤可溶性有机碳主要来源于土壤表

层的腐殖质、植物残体、根系分泌物及微生物的代谢产物等[15,19]。因此,在重度退化刺槐林的经营改造中,应重视不同造林模式下表层凋落物及腐殖质层的保护。

土壤可溶性全氮是土壤中生物可利用氮的重要来源,包括可溶性有机氮和无机氮。土壤中 95%以上的氮素是以有机氮形式存在,可溶性有机氮是土壤有机氮库中活性最高的组分之一。植物残体的归还量和生物固氮是氮素输入的主要途径[27],竹柳+棉花在 5 种造林模式中 0—40 cm 层土壤的可溶性无机氮和总氮的平均含量最高,这与该农林间作模式下生物量和地表凋落物增加有一定关系。除裸地外,白蜡纯林土壤的可溶性无机氮和总氮平均含量最低,这可能与凋落物质量影响凋落物的分解及营养元素的归还有关,白蜡叶片表面有蜡质,分解较慢,影响了土壤中碳氮的补充[15]。可见采用纯林造林模式不利于养分的积累,而棉花的种植增加了白蜡纯林土壤中各氮元素的含量,提高了土壤肥力。由于地表植被生长状况和水肥条件的差异,不同造林模式下,土壤铵态氮、硝态氮、可溶性无机氮和总氮垂直空间分布没有明显的规律性。裸地由于其地表裸露,保水性能差,很容易受到淋溶,故其 0—20 cm 土层可溶性无机氮低于 20—40 cm 土层。在不同造林模式的各土层中,硝态氮含量均低于铵态氮含量。这可能是由于滨海盐碱地通过植被恢复,pH、碳氮比和水分条件均发生变化,影响了硝化作用的进行,这与人工恢复黄河三角洲滨海湿地土壤碳氮含量变化特征[27]的研究结果类似。土壤可溶性有机氮含量的多少可以反映土壤中潜在活性养分的含量和周转速率,与土壤养分循环和供应状况有密切关系[4,6]。可溶性有机氮是林地土壤中可溶性氮的主要组分,占林地土壤可溶性全氮含量的 90%以上[4,8]。香花槐+棉花土壤可溶性有机氮占可溶性全氮的百分比和可溶性全氮占总氮的百分比较其他造林模式高,这可能与香花槐属于豆科植物,豆科植物与根瘤菌组成的共生固氮体系固氮能力强有关,豆科植物的固氮量占全球生物固氮量的 60%以上[10],因此,香花槐+棉花土壤的肥力较高,改良效果好,土壤可溶性有机氮转化为植物可吸收利用的无机氮的潜力较大。综上所述,竹柳和香花槐与棉花的农林间作模式可较好地改善重度退化刺槐林皆伐后的土壤肥力状况。

3.2　不同造林模式土壤各碳、氮形态的相关性

不同造林模式下,不同土壤碳、氮形态之间的相关分析表明(表 3),土壤可溶性有机碳与总氮和铵态氮的相关性达到极显著水平($P<0.01$),说明可溶性有机碳与总氮、铵态氮在黄河三角洲滨海盐碱地不用造林模式的土壤中是相伴存在;可溶性有机碳可较好反映土壤中潜在活性养分含量和周转速率[15],可溶性有机氮较可溶性无机氮更能反映土壤对植被的供氮能力[10]。比较其他研究,黄河三角洲盐碱地混交林土壤可溶性有机碳、可溶性全氮与土壤全氮、有效磷、速效钾和含盐量相关性显著,可溶性有机碳与可溶性全氮可显著降低土壤中的含盐量,而有机质的增加可降低土壤酸碱性[15]。盐碱地人工林土壤可溶性有机氮与可溶性全氮、无机氮、全氮呈极显著相关,与有机质呈显著相关,与土壤含盐量呈负相关[10]。轻度盐渍化土壤环境下,土壤可溶性有机碳和有机氮与其他形态碳、氮之间的相关性分别达极显著或显著性水平[23]。表明随着盐碱生境下土地利用方式[23]、林分类型[15]及造林模式[10]的不同,土壤可溶性有机碳、有机氮与其他形态碳氮之间的相关性大小并不一致。在一定程度上,土壤中的全氮含量决定了土壤可溶性有机碳的质量分数,土壤碳的保持取决于全氮含量水平。

土壤可溶性有机氮含量与土壤可溶性有机碳具有显著正相关($P<0.05$)(表 3),土壤可溶性有机氮含量可能主要与该地区土壤可溶性有机碳含量有关,其含量随着可溶性有机碳以及总氮含量的变化而变化,土壤中较高的有机碳含量可能是促使可溶性有机氮含量及所占氮组分比例较高的主要因子[28]。有研究表明[19-20],在不同土地利用方式和不同人为管理措施下,固氮物种和施氮、磷肥能显著增加土壤碳汇集,固氮物种的存在和氮肥的施用可增加土壤氮含量,提高初级生产力,进而使土壤有机碳的输入增加;另一方面,土壤氮素含量的提高使土壤 C/N 降低,提高微生物活性,加速土壤有机碳的分解,使其含量降低,促进了土壤营养元素的循环,有助于初级生产力的提高[4,6]。此外,土壤可溶性有机碳和可溶性有机氮与总氮、铵态氮之间的相关系数也分别达到极显著或显著性水平,说明盐碱土壤中这些形态的碳、氮之间具有较好的相关关系,对土壤养分的调节和转化利用具有重要作用。

表 3 土壤中各碳、氮之间的相关系数

Table 3 Correlation coefficients between soil carbon and nitrogen

指标 Index	铵态氮 NH_4^+-N	硝态氮 NO_3^--N	可溶性无机氮 SIN	可溶性有机氮 SON	可溶性全氮 TSN	全氮 TN	可溶性有机碳 DOC
铵态氮 NO_3^--N	0.257	1					
可溶性无机氮 SIN	0.829 *	0.714	1				
可溶性有机氮 SON	0.943 **	0.143	0.714	1			
可溶性全氮 TSN	0.771 *	0.143	0.486	0.829 *	1		
全氮 TN	0.943 **	0.543	0.943 **	0.886 **	0.714	1	
可溶性有机碳 DOC	0.943 **	0.314	0.771 *	0.829 *	0.829 *	0.886 **	1
可溶性全碳 TOC	0.829 *	0.314	0.829 *	0.657	0.371	0.771 *	0.771 *

* $P<0.05$, ** $P<0.01$

4 结论

(1)农林间作模式下土壤可溶性总碳和可溶性有机碳含量显著高于纯林模式,并且不同造林模式下,土壤 0—20 cm 可溶性有机碳含量高于 20—40 cm 土层。受土壤熟化程度、植被覆盖度、凋落物形成腐殖质层厚度以及植被本身降盐改土的影响,不同造林模式下 0—40 cm 土壤可溶性总碳和可溶性有机碳含量,总体表现为竹柳+棉花含量最高,其次是白蜡+棉花,香花槐+棉花,而白蜡和竹柳纯林含量较低。

(2)不同造林模式下 0—40 cm 土壤的可溶性全氮和可溶性有机氮平均含量均高于裸地。农林间作模式地表覆盖度较高,腐殖质层较厚,致使农林间作模式有效氮含量高于纯林模式,竹柳+棉花可溶性全氮和可溶性有机氮含量最高,竹柳和白蜡纯林含量较低。在土壤垂直层次上,受土壤表层的腐殖质、植物残体及根系分泌物等的影响,白蜡+棉花,竹柳+棉花 2 种农林间作模式和竹柳纯林模式,0—20 cm 土壤可溶性全氮含量显著高于 20—40 cm 土层。

(3)竹柳+棉花农林间作模式在 5 种造林模式中土壤 0—40 cm 层可溶性无机氮和总氮的平均含量最高,可溶性有机氮是滨海盐碱地土壤可溶性总氮的主要组成部分,占可溶性总氮含量的一半以上。盐碱生境下,土壤可溶性有机碳与全氮和铵态氮的相关性达到极显著水平,可溶性有机碳和可溶性有机氮与总有机碳和全氮之间关系密切,可较好反映土壤养分循环和供应状况,在调节土壤养分和提供可利用碳氮等方面具有重要作用。

综上所述,竹柳+棉花土壤可溶性有机碳及各形态氮的含量是 5 种造林模式中最高的,香花槐+棉花土壤中有机氮转化潜力较大,纯林与棉花的农林间作模式较一般纯林模式可显著提高土壤可溶性有机碳和各形态氮的含量。

参考文献(References):

[1] McLauchlan K K, Hobbie S E, Post W M. Conversion from agriculture to grassland builds soil organic matter on decadal timescales. Ecological Applications, 2006, 16(1): 143-153.

[2] Arai H, Tokuchi N. Soil organic carbon accumulation following afforestation in a Japanese coniferous plantation based on particle-size fractionation and stable isotope analysis. Geoderma, 2010, 159(3/4): 425-430.

[3] 商素云, 姜培坤, 宋照亮, 李永夫, 林琳. 亚热带不同林分土壤表层有机碳组成及其稳定性. 生态学报, 2013, 33(2): 416-424.

[4] Priess J A, de Koning G H J, Veldkamp A. Assessment of interactions between land use change and carbon and nutrient fluxes in Ecuador. Agriculture Ecosystem and Environment, 2001, 85(1-3): 269-279.

[5] Saidy A R, Smernik R J, Baldock J A, Kaiser K, Sanderman J, Macdonald L M. Effects of clay mineralogy and hydrous iron oxides on labile organic carbon stabilisation. Geoderma, 2012, 173-174: 104-110.

[6] Liao J D, Boutton T W, Jastrow J D. Storage and dynamics of carbon and nitrogen in soil physical fractions following woody plant invasion of grassland. Soil Biology & Biochemistry, 2006, 38(11): 3184-3196.

[7] Näsholm T, Ekblad A, Nordin A, Giesler R, Högberg M, Högberg P. Boreal forest plants take up organic nitrogen. Nature, 1998, 392(6679):

914-916.

[8] Russell A E, Raich J W, Valverde-Barrantes O J, Fisher R F. Tree species effects on soil properties in experimental plantations in tropical moist forest. Soil Science Society of America Journal, 2007, 71(4): 1389-1397.

[9] 刘全友, 童依平. 北方农牧交错带土地利用类型对土壤养分分布的影响. 应用生态学报, 2005, 16(10): 1849-1852.

[10] 陈印平, 夏江宝, 王进闯, 曹建波, 乔云蕾, 孙晓群. 黄河三角洲盐碱地人工林土壤可溶性有机氮含量及特性. 水土保持学报, 2011, 25(4): 121-124, 130-130.

[11] 张俊华, 李国栋, 南忠仁. 黑河中游典型土地利用方式下土壤粒径分布及与有机碳的关系. 生态学报, 2012, 32(12): 3745-3753.

[12] 汤洁, 韩维峥, 李娜, 徐小明, 李云飞. 吉林西部草地生态系统不同退化演替阶段土壤有机碳变化研究. 生态环境学报, 2010, 19(5): 1182-1185.

[13] 康健, 孟宪法, 许妍妍, 栾婧, 隆小华, 刘兆普. 不同植被类型对滨海盐碱土壤有机碳库的影响. 土壤, 2012, 44(2): 260-266.

[14] 李玲, 赵西梅, 孙景宽, 夏江宝, 谢文军, 刘京涛, 陆兆华. 造纸废水灌溉对盐碱芦苇湿地土壤活性氮的影响. 土壤通报, 2013, 44(2): 450-454.

[15] 陈印平, 夏江宝, 曹建波, 王进闯. 黄河三角洲盐碱地不同混交林土壤可溶性有机碳氮的研究. 水土保持通报, 2013, 33(5): 87-91.

[16] 夏江宝, 许景伟, 李传荣, 刘京涛, 王月海, 陆兆华. 黄河三角洲低质低效人工刺槐林分类与评价. 水土保持通报, 2012, 32(1): 217-221.

[17] 马风云, 白世红, 侯本栋, 刘艳, 侯龙鱼. 黄河三角洲退化人工刺槐林地土壤特征. 中国水土保持科学, 2010, 8(2): 74-79.

[18] 夏江宝, 许景伟, 李传荣, 刘京涛, 王月海, 陆兆华. 黄河三角洲盐碱地道路防护林对土壤的改良效应. 水土保持学报, 2011, 25(6): 72-75, 91-91.

[19] Arrouays D, Pelissier P. Modeling carbon storage profiles in temperate forest humic loamy soils of France. Soil Science, 1994, 157: 185-192.

[20] Laganière J, Angers D A, Paré D. Carbon accumulation in agricultural soils after afforestation: a meta-analysis. Global Change Biology, 2010, 16(1): 439-453.

[21] 张彪, 高人, 杨玉盛, 杨智杰, 陈光水. 万木林自然保护区不同林分土壤可溶性有机氮含量. 应用生态学报, 2010, 21(7): 1635-1640.

[22] 胡会峰, 刘国华. 人工油松林恢复过程中土壤理化性质及有机碳含量的变化特征. 生态学报, 2013, 33(4): 1212-1218.

[23] 吕学军, 刘庆, 陈印平, 李玲. 黄河三角洲土地利用方式对土壤可溶性有机碳、氮的影响. 农业现代化研究, 2011, 32(4): 505-508.

[24] Ussiri D A N, Johnson C E. Organic matter composition and dynamics in a northern hardwood forest ecosystem 15 years after clear-cutting. Forest Ecology and Management, 2007, 240(1-3): 131-142.

[25] Uselman S M, Qualls R G, Lilienfein J. Contribution of root vs. leaf litter to dissolved organic carbon leaching through soil. Soil Science Society of America Journal, 2007, 71(5): 1555-1563.

[26] Kalbitz K, Meyer A, Yang R, Gerstberger P. Response of dissolved organic matter in the forest floor to long-term manipulation of litter and throughfall inputs. Biogeochemistry, 2007, 86(3): 301-318.

[27] 董凯凯, 王惠, 杨丽原, 杨宝山, 解伏菊. 人工恢复黄河三角洲湿地土壤碳氮含量变化特征. 生态学报, 2011, 31(16): 4778-4782.

[28] Song L C, Hao J M, Cui X Y. Soluble organic nitrogen in forest soils of northeast China. Journal of Forestry Research, 2008, 19(1): 53-57.