

土壤碳氮比对平邑甜茶幼苗生长和碳氮分配的影响

葛顺峰 许海港 季萌萌 姜远茂*

山东农业大学园艺科学与工程学院, 山东农业大学作物生物学国家重点实验室, 山东泰安 271018

摘要 为探讨土壤碳氮比(C:N)对苹果(*Malus pumila*)植株生长和碳氮分配特性的影响, 采用碳氮双标记示踪技术, 以二年生平邑甜茶(*Malus hupehensis*)幼苗为试验材料, 研究了6个不同土壤C:N处理(T1–T6分别为4.70、9.78、14.70、19.96、25.60和28.83)下平邑甜茶的生长状况和氮素吸收、利用分配以及碳水化合物的运转特性。结果表明, 随着土壤C:N的逐渐增大, 平邑甜茶幼苗根系干重逐渐增加, 而株高、茎粗、地上部干重和植株总干重呈先增加后降低的趋势, 以T4处理最大。土壤C:N显著影响了平邑甜茶幼苗的¹⁵N利用率, 从T1到T4处理, 植株的¹⁵N利用率逐渐升高, T4处理(18.46%)是T1处理(10.65%)的1.73倍; 随着土壤C:N的进一步增加, 植株的¹⁵N利用率逐渐降低, T5和T6处理分别比T4处理降低了1.59%和2.58%。土壤C:N较低的T1和T2处理, 平邑甜茶幼苗各器官从肥料中吸收分配到的¹⁵N量对该器官全氮量的贡献率(*Ndff*)大小顺序为根>叶>茎, 随着土壤C:N的进一步增大, 叶片的*Ndff*均为最大, 其次是根, 茎最少。随着土壤C:N的增大, 叶片¹⁵N分配率逐渐升高, ¹³C分配率逐渐降低; 而根系¹⁵N分配率逐渐降低, ¹³C分配率逐渐升高。综合考虑植株生长和氮素利用状况, 本试验条件下适宜平邑甜茶生长的土壤C:N为21–23。

关键词 ¹³C, ¹⁵N, 分配, 生长, 平邑甜茶, 土壤碳氮比, 利用

Effects of soil C:N on growth and distribution of nitrogen and carbon of *Malus hupehensis* seedlings

GE Shun-Feng, XU Hai-Gang, JI Meng-Meng, and JIANG Yuan-Mao*

College of Horticulture Science and Engineering, State Key Laboratory of Crop Biology, Shandong Agricultural University, Tai'an, Shandong 271018, China

Abstract

Aims Soil C:N is a sensitive indicator of soil quality and an indicator for assessing carbon and nitrogen nutrition balance of soils. Our objective was to explore the effects of soil C:N on growth and distribution of nitrogen and carbon of *Malus hupehensis* seedlings.

Methods Using the track technology of C and N double mark, we investigated growth parameters (height, stem diameter and dry matter of different organs), ¹⁵N parameters (absorption, N derived from fertilizer, distribution and utilization) and ¹³C parameters (distribution in different organs) of two-year old *M. hupehensis* seedlings under six different soil C:N treatments (T1–T6 were 4.70, 9.78, 14.70, 19.96, 25.60 and 28.83, respectively).

Important findings With increase of soil C:N, dry matter of roots increased significantly, while the height, stem diameter and dry matter of above ground parts and total plant increased at first and then decreased. The highest value appeared in the T4 treatment. There were significant differences in ¹⁵N utilization efficiency among the six different treatments. ¹⁵N utilization efficiency increased from T1 to T4, and the rate of T4 (18.46%) was 1.73 times than that of T1. But, the ¹⁵N utilization efficiency decreased with a further increase of soil C:N, as the rate of T5 and T6 reduced that of T4 by 1.59% and 2.58%, respectively. In the two lower soil C:N treatments (T1 and T2), the order of *Ndff* value (¹⁵N derived from fertilizer) in the organs was roots > leaves > stems. With increase of soil C:N, *Ndff* value in leaves was the highest, followed by roots and stems. ¹⁵N distribution ratio in leaves increased, while ¹³C distribution decreased with increase of soil C:N, but the changes were the opposite in roots. Considering plant growth and utilization of nitrogen, the suitable soil C:N was 21–23 under these experimental conditions.

Key words ¹³C, ¹⁵N, distribution, growth, *Malus hupehensis*, soil C:N, utilization

我国是世界苹果(*Malus pumila*)第一生产大国, 2011年全国苹果种植面积约199万hm²、总产量35 ×

10⁶吨, 分别占全世界的1/3和1/4 (中华人民共和国农业部, 2011), 果业逐渐成为苹果产区农民增收的

重要支柱产业。由于片面地追求高产,大量的无机化肥被应用到苹果生产中,而肥料的过量施用,在提高产量的同时,也带来了土壤质量下降、生态环境恶化等不良后果(张维理等, 1995; 吕殿青等, 1998; Motavalli & Miles, 2002; Galantini & Rosell, 2006; Vogeler *et al.*, 2009)。土壤中的有机碳和氮素是地表植被生长的主要营养源,常被作为土壤质量评价和土地可持续利用管理的重要参考指标,也是陆地土壤碳库和氮库的重要组成部分,它们不仅反映土壤肥力水平,也印证区域生态系统演变规律,它们之间的关系可以用土壤C:N来表示,即土壤有机碳含量与全氮含量的比值,它是土壤质量的敏感指标,它的演变趋势对土壤碳、氮循环和植株的生长发育进程有重要影响(隋跃宇等, 2005; 姜勇等, 2007; Liu *et al.*, 2011; 吴海斌等, 2011; 张春华等, 2011)。研究表明,低的C:N可以加快微生物分解和氮的矿化速率,高的C:N对土壤微生物的活动能力有一定的限制作用,使有机质和有机氮的分解矿化速度减慢,土壤固定有机碳的能力提高(Springob & Kirchmann, 2003)。

当前,我国苹果园土壤全氮含量达0.8–1.3 g·kg⁻¹,而有机碳含量不足1% (姜远茂等, 2001; 杨雨林等, 2008),再加上缺乏有效的管理措施,造成了土壤C:N失调,这是导致果园土壤质量退化、土壤微生物多样性下降、土传病害严重、果品产量品质下降的重要原因(束怀瑞, 2003)。氮素和光合产物在苹果生长发育、花芽分化及产量形成方面具有决定性作用(束怀瑞, 1999; 李天忠和张志宏, 2008),而目前关于土壤C:N的研究主要集中在如何通过添加有机物质来提高土壤C:N和作物品质的研究上(刘世亮等, 2007; 李雪利等, 2011; Schipper & Sparling, 2011),关于土壤C:N对苹果植株生长及碳氮代谢特性的研究尚未见报道。为此,本研究以生产上常用的苹果砧木——平邑甜茶(*Malus hupehensis*)为试验材料,研究了土壤C:N对平邑甜茶幼苗生长和氮素吸收、利用分配以及碳水化合物的运转特性,以期苹果生产上调节合理的土壤C:N提供理论依据。

1 材料和方法

1.1 试验设计

试验于2012年4–10月在山东农业大学园艺试验站进行。供试土壤来自山东省烟台市栖霞市苏家

店镇小徐家村苹果园,通过大量采样分析,我们选取了6份具有不同土壤C:N、其他养分含量相近的土壤,土壤类型为黏质壤土,各处理土壤基本理化性质见表1。

试验采用普通陶盆,每盆装风干土12 kg。于2012年3月26日,选取长势基本一致、无病虫害的二年生平邑甜茶实生苗移栽入盆中,待幼苗长势平稳后,每个处理选取长势基本一致的幼苗12盆进行试验,每盆1株。各处理中的12株植株分为2组,每组6株。第1组:于4月15日进行¹⁵N标记处理,每株施入¹⁵N-尿素0.50 g (¹⁵N丰度为10.25%,上海化工研究院生产),同时每株另施入硫酸钾0.43 g、过磷酸钙0.38 g。于9月18日对这6株植株进行¹³C脉冲标记。第2组:每株施入普通尿素0.50 g、硫酸钾0.43 g、过磷酸钙0.38 g,作为对照。各处理生长条件和栽培管理均保持一致。

¹³C脉冲标记在一个由透明农用地膜做成的标记室内进行(Lu *et al.*, 2002),标记前先检查标记室的密封性(何敏毅等, 2008)。然后将风扇、平邑甜茶植株、还原铁粉和¹³C丰度(¹³C在全部碳元素中所占比例)为98%的Ba¹³CO₃ 0.6 g放入标记室内,将整个标记室密封。上午9:00开始标记,先用注射器向装有Ba¹³CO₃的烧杯中注入一定量1 mol·L⁻¹的HCl溶液,开动风扇,标记开始。此后每隔0.5 h,向烧杯中注入1次HCl,以维持CO₂浓度。标记时间持续4 h。标记结束后,把植株放置于远离其他未标记植株处,以防呼吸产生的¹³CO₂对其他植株造成污染。

1.2 测定项目和方法

¹³C脉冲标记完后的第3天(9月21日),对所有处理进行破坏性采样。植株解析为根、茎和叶3部分,样品按清水→洗涤剂→清水→1%盐酸→3次去离子水顺序冲洗后,105 °C下杀青30 min,随后在80 °C下烘干至恒重,粉碎后过0.25 mm筛,混匀后装袋备用。¹³C丰度用DELTA^{plus}XP型质谱仪(Thermo Electron GmbH, Bremen, Germany)测定,¹⁵N丰度用ZHT-03(北京分析仪器厂)质谱仪测定,全氮用凯氏定氮法测定,各器官干样质量用1/1000电子天平称量。

1.3 数据统计

(1) ¹³C丰度: $F_i (\%) = (\delta^{13}\text{C} + 1000) \times R_{\text{PBD}} / ((\delta^{13}\text{C} + 1000) \times R_{\text{PBD}} + 1000) \times 100$, R_{PBD} (碳同位素的标准比值) = 0.011 237 2;

表1 供试土壤基本理化性质

Table 1 Basic physiochemical properties of the test soil

处理 Treatment	土壤碳氮比 Soil C:N	有机碳 Organic carbon (g·kg ⁻¹)	全氮 Total N (g·kg ⁻¹)	碱解氮 Alkali-hydrolysable N (mg·kg ⁻¹)	速效磷 Available P (mg·kg ⁻¹)	速效钾 Available K (mg·kg ⁻¹)	pH
T1	4.70	4.89	1.01	86.60	58.55	166.30	5.65
T2	9.78	10.46	1.05	99.95	56.92	158.54	5.69
T3	14.70	15.43	1.04	95.73	58.27	169.42	5.59
T4	19.96	20.36	1.07	98.52	64.26	182.05	5.60
T5	25.60	25.09	1.03	92.89	62.76	171.42	5.64
T6	28.83	29.98	1.04	100.34	71.51	184.67	5.63

(2)进入各组分的¹³C量: $^{13}C_i$ (mg) = $C_i \times (F_i - F_{nl}) / 100 \times 1000$, 式中 C_i 为各组分所含的碳量(g); nl 表示未标记;

(3)¹³C在各器官的分配率: $^{13}C_i$ (%) = $^{13}C_i / ^{13}C_{\text{净吸收}} \times 100$;

(4)植株器官从肥料中吸收分配到的¹⁵N量对该器官全氮量的贡献率($Ndff\%$) = 植物样品中¹⁵N原子百分超%/肥料中¹⁵N原子百分超% $\times 100$;

(5)氮肥利用率(%) = ($Ndff \times$ 器官全氮量(g))/施氮量(g) $\times 100$, 式中 $Ndff$ (%) = 植物样品中¹⁵N原子百分超%/肥料中¹⁵N原子百分超% $\times 100$; 原子百分超% = 样品中¹⁵N丰度% - 自然丰度%;

(6)氮肥分配率(%) = 各器官从氮肥中吸收的氮量(g)/总吸收氮量(g) $\times 100$ 。

用Excel 2003和SAS 9.0进行数据处理及统计分析, 用one-way ANOVA进行差异显著性分析。

2 结果和分析

2.1 不同土壤C:N对平邑甜茶幼苗生长量和根冠比的影响

由表2可见, 不同土壤C:N处理下平邑甜茶幼苗的生物量存在显著差异。随着土壤C:N的增大, 根系干重逐渐增加; 并且当土壤C:N处于低水平时(T1–T3), 根系干重增加的幅度较大, T2比T1增加了5.89 g, T3比T2增加了6.19 g; 当土壤C:N增加到一定数值(>T4)后, 根系干重小幅增加但差异不显著, T5比T4增加了2.08 g, T6比T5增加了0.37 g。从T1到T4处理, 株高、茎粗、地上部干重和植株总干重逐渐升高, 然后随着土壤C:N的进一步增加而逐渐降低。各处理的植株根冠比随土壤C:N的增加呈现无规律变化, T1、T5和T6处理的根冠比均大于1, 三者间无显著差异; T3和T4两个处理的根冠比较低, 分

别为0.85和0.87。可见, 随着土壤C:N的增加, 平邑甜茶幼苗根系生物量逐渐增大, 但当土壤C:N增加到一定值后, 将会对植株地上部的生长产生抑制作用。

2.2 不同土壤C:N对平邑甜茶幼苗¹⁵N利用率、各器官 $Ndff$ 和¹⁵N分配率的影响

由表3可见, 土壤C:N显著影响了平邑甜茶幼苗的¹⁵N利用率。随着土壤C:N的增加, 植株的¹⁵N利用率呈先升高后降低的变化趋势。从T1到T4处理平邑甜茶幼苗的¹⁵N利用率逐渐升高, 由T1处理的10.65%增加到T4处理的18.46%, T4处理是T1处理的1.73倍, 且各处理间差异显著。随着土壤C:N的进一步增加, 平邑甜茶幼苗的¹⁵N利用率逐渐降低, T5和T6处理分别比T4处理降低了1.59和2.58个百分点, T4与T5间差异不显著, 但显著高于T6处理。可见, 土壤C:N太低或太高均不利于植株对外施氮肥的吸收。

器官的 $Ndff$ 指植株器官从肥料中吸收分配到的¹⁵N量对该器官全氮量的贡献率, 反映了植株器官对肥料¹⁵N的吸收征调能力(顾曼如, 1990)。不同土壤C:N处理, 树木吸收的¹⁵N在各器官间的分配规律不同(表3)。土壤C:N较低的两个处理(T1和T2), 平邑甜茶幼苗各器官的 $Ndff$ 大小顺序为根>叶>茎, 而T3–T6处理, 随着土壤C:N的进一步增大, 叶片的 $Ndff$ 均为最大, 其次是根, 茎最少, 表明当土壤C:N较低时, 根系对肥料氮的征调能力最强, 即树木新吸收的氮主要用于根系的生长发育; 而当土壤C:N较高时, 叶片对肥料氮的征调能力最强, 这时树木新吸收的氮主要用于地上部的生长发育。并且, T1处理植株各器官的 $Ndff$ 均高于其他土壤C:N较高的处理, 表明当土壤C:N很低时, 植株主要利用肥料中的氮, 而土壤C:N较高时, 土壤和肥料中的氮

表2 不同土壤C:N处理对平邑甜茶幼苗生长的影响

Table 2 Effects of different soil C:N on growth of *Malus hupehensis* seedlings

处理 Treatment	株高 Plant height (cm)	茎粗 Stem diameter (mm)	根干重 Roots dry weight (g)	地上部干重 Aboveground dry weight (g)	总干重 Total dry weight (g)	根冠比 Root-shoot ratio
T1	43.82 ^c	5.52 ^c	17.78 ^d	15.32 ^d	33.10 ^d	1.16 ^a
T2	62.51 ^b	6.46 ^b	23.67 ^c	24.41 ^c	48.08 ^c	0.97 ^{ab}
T3	74.56 ^a	7.52 ^a	29.86 ^b	34.99 ^{ab}	64.85 ^b	0.85 ^b
T4	79.43 ^a	7.83 ^a	32.64 ^{ab}	37.57 ^a	70.21 ^a	0.87 ^b
T5	77.92 ^a	7.66 ^a	34.72 ^a	34.45 ^{ab}	69.17 ^{ab}	1.01 ^a
T6	74.94 ^a	7.57 ^a	35.09 ^a	32.62 ^b	67.71 ^{ab}	1.08 ^a

T1-T6, 土壤碳氮比分别为4.70、9.78、14.70、19.96、25.60和28.83。同列不同字母表示差异显著($p < 0.05$)。

T1-T6, soil C:N are 4.70, 9.78, 14.70, 19.96, 25.60 and 28.83, respectively. Different letters in the same column indicate significant difference ($p < 0.05$).

表3 不同土壤C:N处理对¹⁵N利用率、各器官从肥料中吸收分配到的¹⁵N量对该器官全氮量的贡献率(*Ndff*)和¹⁵N分配率的影响
Table 3 Effects of different soil C:N treatment on ¹⁵N utilization efficiency, ¹⁵N derived from fertilizer (*Ndff*) and ¹⁵N distribution ratio of different organs

处理 Treatment	¹⁵ N利用率 ¹⁵ N utilization efficiency (%)	<i>Ndff</i> (%)			¹⁵ N分配率 ¹⁵ N distribution ratio (%)		
		叶 Leaf	茎 Stem	根 Root	叶 Leaf	茎 Stem	根 Root
		T1	10.65 ^c	6.69 ^a	4.39 ^a	7.12 ^a	41.93 ^d
T2	13.64 ^d	5.73 ^b	3.68 ^e	6.47 ^b	47.71 ^c	11.87 ^a	40.42 ^b
T3	15.78 ^{bc}	5.21 ^c	3.48 ^d	5.02 ^c	53.85 ^b	10.39 ^a	35.76 ^c
T4	18.46 ^a	5.09 ^c	3.82 ^c	4.31 ^e	63.36 ^a	9.89 ^a	26.75 ^d
T5	16.87 ^{ab}	5.15 ^c	4.01 ^b	4.72 ^d	62.90 ^a	10.67 ^a	26.43 ^d
T6	15.88 ^{bc}	5.94 ^b	3.68 ^e	4.74 ^d	63.81 ^a	10.21 ^a	25.98 ^d

表注同表2。

Notes see Table 2.

均可被植株吸收利用。

各器官中¹⁵N占全株¹⁵N总量的百分率反映了肥料氮在树体内的分布及在各器官迁移的规律(徐季娥等, 1993)。由表3可见, 随着土壤C:N的增大, 叶片¹⁵N分配率逐渐增加, 而根系逐渐降低, 茎中无明显变化。除了T1处理根中的¹⁵N分配率高于叶片外, 其他处理均表现为叶>根>茎, 表明土壤C:N较低时, 植株吸收的氮素主要分配至根系, 促进根系的生长发育; 当土壤C:N较高时, 则主要分配至地上部, 用于地上部器官的构建。

2.3 不同土壤C:N对平邑甜茶幼苗各器官¹³C分配率的影响

¹³C分配率反映了叶片制造的光合产物在树体各器官间的迁移规律。由表4可见, 不同土壤C:N处理平邑甜茶幼苗各器官间的¹³C分配规律一致: 叶最高(32.29%–44.72%), 其次是茎(35.53%–37.58%), 根最低(19.75%–31.67%)。

同一器官不同土壤C:N处理间¹³C的分配率存在差异, 以叶和根最为显著。其中, ¹³C在叶中的分配率表现为随土壤C:N的升高而逐渐降低, T1处理(44.72%)是T6处理(32.29%)的1.38倍; 而根中的¹³C分配率与叶片表现出相反的变化规律, 随着土壤C:N的升高而逐渐升高, T6处理最高(31.67%), T1处理最低(19.75%), T6处理是T1处理的1.60倍; 茎中的¹³C分配率在不同土壤C:N处理间差异不大。

2.4 适宜土壤C:N的确定

植株生物量和氮素利用效率是评价植株生长和氮素利用特性的重要指标。为确定本试验条件下的适宜土壤C:N, 我们将这两个指标与土壤C:N进行了拟合分析。由图1可见, 植株生物量和氮素利用效率与土壤C:N的关系均呈抛物线状, 即随着土壤C:N的升高, 这两个指标均呈先升高后降低的变化趋势。通过对函数计算分析, 植株生物量和氮素利用效率出现最大值时的土壤C:N分别为21.29和

表4 不同土壤C:N处理对各器官¹³C分配率的影响
Table 4 Effects of different soil C:N treatment on ¹³C distribution ratio of different organs (%)

处理 Treatment	叶 Leaf	茎 Stem	根 Root
T1	44.72 ^a	35.53 ^b	19.75 ^d
T2	38.79 ^b	37.58 ^a	23.63 ^c
T3	35.78 ^c	36.33 ^a	27.89 ^b
T4	33.18 ^{cd}	35.78 ^b	31.04 ^a
T5	32.67 ^d	37.06 ^a	30.87 ^a
T6	32.29 ^d	36.04 ^{ab}	31.67 ^a

表注同表2。

Notes see Table 2.

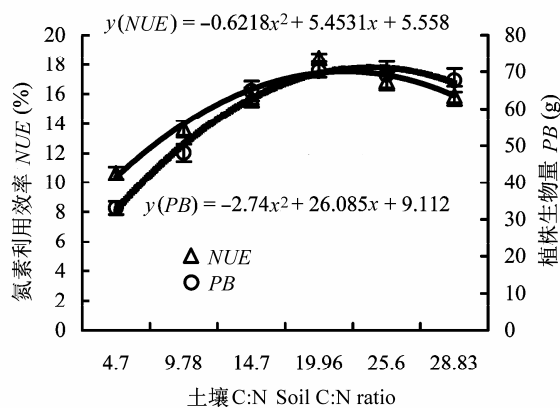


图1 土壤C:N与氮素利用效率(NUE)和植株生物量(PB)的关系。

Fig. 1 Relationships between soil C:N and N utilization efficiency (NUE) and plant biomass (PB).

23.11。因此,综合考虑这两个指标得出本试验条件下平邑甜茶生长发育适宜的土壤C:N为21–23。

3 讨论

土壤C:N是土壤质量的敏感指标,其值高低对土壤氮素转化具有重要影响,从而影响植株的生长发育进程(Springob & Kirchmann, 2003; Schipper & Sparling, 2011)。李雪利等(2011)在烟草上的研究表明,土壤C:N在24–28之间最有利于烟株生长过程中碳氮代谢和提高烟叶内在化学成分的协调性,改善烟叶品质,但当土壤C:N过高时则相反。刘世亮等(2007)的研究也表明,适宜的土壤C:N有利于提高叶片叶绿素的含量和含氮量以及硝酸还原酶活性,而随着C:N的进一步增大,这些指标呈降低趋势。本试验中,随着土壤C:N的增大,植株根系生物量逐渐增加,而地上部生物量和植株总生物量则呈先升

高后降低的变化趋势,以T4处理(土壤C:N = 19.96) 15N 的利用率最高,而随着C:N的进一步增大,肥料氮素利用率逐渐降低。这可能是因为C:N较高时,土壤中的微生物大量繁殖,而微生物的大量繁殖需要消耗一部分氮素,就会出现微生物与植株共同竞争土壤中的氮素,因此影响植株的生长和根系对养分的吸收(刘臧珍等, 1995; 刘畅等, 2008); 而当土壤C:N较低时,可供微生物利用的碳源较少,微生物活性降低,从而影响养分的有效性,使得养分不利于被植株根系吸收,进而抑制植株生长发育(Springob & Kirchmann, 2003; Schipper & Sparling, 2011); 适宜的土壤C:N能够限制土壤微生物的活动能力(Goyal *et al.*, 1999), 减慢有机碳和有机氮的分解矿化速度,有利于土壤有机碳的固存,同时也不至于使土壤微生物对施入氮素的“固持”强度太高,有利于充分发挥肥料氮的有效性,促进植株对肥料氮的吸收利用(Eswaran *et al.*, 1993; Schipper & Sparling, 2011)。各器官的¹⁵N分配率反映了树体新吸收的肥料氮在树体各器官间的迁移规律不同(徐季娥等, 1993), 本研究中随着土壤C:N的增大,叶片¹⁵N分配率逐渐增加,而根系逐渐降低。表明土壤C:N较低时根系对氮的征调能力最强,有利于根系的快速发育,从而吸收更多的氮素来供应地上部分的生长,这也是氮高效利用机制下根系的生理学反应之一(Worku *et al.*, 2007); 而当土壤C:N较高时,植株根系的生长状况良好,现有的根系即可满足植株对氮素养分的需求,不需要根系的过多生长,而是将新吸收的肥料氮更多地转运至地上部分,用于地上部分器官的构建。

根系吸收营养物质及营养物质向地上部运输的能力,以及叶片光合产物向根系运输的速率与数量,是导致树体生长发育发生变化的主要原因(李天忠和张志宏, 2008)。光合产物在体内的运输、分配情况是影响果树优质、丰产、稳产的重要因素(束怀瑞, 1999)。本研究采用¹³C同位素技术研究了光合产物的分配状况,结果表明同一器官在不同土壤C:N处理间¹³C的分配率不同,其中尤以根和叶最为显著。随着土壤C:N的增大,叶片制造的碳水化合物

物自留量减少,增加了光合产物向根系的分配,地上和地下营养交换较强,使根系获得了较多的能量,从而提高了根系对矿质养分的吸收(李燕婷等, 2001; 春亮等, 2005; 王海宁等, 2012),这也正是较高的土壤C:N条件下植株根系生物量和氮素利用率较高的原因所在。

除土壤C:N外,土壤中其他养分的状况也会影响植株的生长发育和碳氮代谢。为了保证试验条件的唯一差异,本试验通过大量采样分析(共测定了95个样本),选取了6份具有不同土壤C:N、其他养分含量相近的土样作为试验材料,但所选土样中的碱解氮、速效磷和速效钾含量还是略有差别。虽然碱解氮、速效磷和速效钾含量略有差别,但我们认为造成本试验中各处理间结果差异的主要因素是土壤C:N,而非碱解氮、速效磷和速效钾,原因主要有3点: 1)碱解氮、速效磷和速效钾含量并不是随着土壤C:N比的升高而逐渐增加的; 2)根据姜远茂等(2007)和卢树昌(2009)制定的果园养分分级标准,这6份土样的碱解氮、速效磷和速效钾含量均处于同一水平,碱解氮含量均处于适宜水平,速效磷含量均处于高水平,速效钾含量均处于适宜水平; 3)将试验结果与各处理土壤的所有参数进行多元线性分析后表明造成结果差异的主要因素是土壤C:N比,而碱解氮、速效磷和速效钾与各个指标的相关性很小。

综合土壤C:N对苹果植株生长及碳氮代谢状况来看,土壤C:N太高或太低时均不利于植株生长和氮素吸收,也影响了叶片制造的碳水化合物在地上部分和地下部分之间的交换,进而影响了根系功能。通过对植株生物量和氮素利用效率与土壤C:N进行拟合分析,两者出现最大值时的C:N分别为21.29和23.11。植株生物量由地上部分和根系两部分组成,随着土壤C:N的增加,植株生物量和根系生物量均逐渐增加,而当根系生物量较高,即根冠比较大时,会影响地上部分的生长,从而造成植株总生物量的降低(李燕婷等, 2001);而当根系生物量较大时,有利于根系对土壤中氮素的吸收,因此植株生物量和氮素利用效率出现最大值时的土壤C:N有所差异。因此,综合考虑植株生物量和氮素利用效率,得出本试验条件下适宜的土壤C:N为21-23,在此范围内,既能促进植株的生长发育,又可以提高氮素利用率和光合产物在地上部分和地下

部分的交换能力。本试验是在盆栽条件下进行的,由于空间的局限会影响根系的生长,因此大田条件下苹果植株对土壤C:N的反应仍需进一步研究。同时,本试验所采用的土壤类型为壤土,而不同类型的土壤由于其自身通气性及持水保肥能力的不同也会影响植株对土壤C:N的反应,比如沙土的通气性较好,但保水保肥能力较弱,因此可能需要较高的土壤C:N来为根系创造最优的生长空间。所以,其他土壤类型下适宜于苹果植株生长发育的土壤C:N的确定仍需深入研究。因此,在土壤类型为壤土的苹果园生产上应用生物秸秆或者其他外源碳来提高果园土壤C:N时,要根据土壤氮素水平状况,调整外源碳的添加量,控制土壤C:N处于21-23,从而达到高产、优质、高效的目的。

基金项目 现代农业产业技术体系建设专项(CARS-28)、公益性行业(农业)科研专项(201103003)和山东省农业重大应用创新课题(201009)。

参考文献

- Chun L, Chen FJ, Zhang FS, Mi GH (2005). Root growth, nitrogen uptake and yield formation of hybrid maize with different N efficiency. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 11, 615-619. (in Chinese with English abstract) [春亮, 陈范骏, 张福锁, 米国华 (2005). 不同氮效率玉米杂交种的根系生长、氮素吸收与产量形成. *植物营养与肥料学报*, 11, 615-619.]
- Eswaran H, van der Berg E, Reich P (1993). Organic carbon in soils of the world. *Soil Science Society of America Journal*, 57, 192-194.
- Galantini J, Rosell R (2006). Long-term fertilization effects on soil organic matter quality and dynamics under different production systems in semiarid Pampean soils. *Soil and Tillage Research*, 87, 72-79.
- Goyal S, Chander K, Mundra MC, Kapoor KK (1999). Influence of inorganic fertilizers and organic amendments on soil organic matter and soil microbial properties under tropical conditions. *Biology and Fertility of Soils*, 29, 196-200.
- Gu MR (1990). Application of ^{15}N on the nitrogen nutritional study in apple trees. *China Fruits*, (2), 46-48. (in Chinese with English abstract) [顾曼如 (1990). ^{15}N 在苹果氮素营养研究中的应用. *中国果树*, (2), 46-48.]
- He MY, Meng FQ, Shi YJ, Wu WL (2008). Estimating photosynthesized carbon distribution and inputs into belowground in a maize soil following ^{13}C pulse-labeling. *Environmental Science*, 29, 446-453. (in Chinese with English abstract) [何敏毅, 孟凡乔, 史雅娟, 吴文良

- (2008). 用¹³C脉冲标记法研究玉米光合碳分配及其向地下的输入. *环境科学*, 29, 446–453.]
- Jiang Y, Zhuang QL, Liang WJ (2007). Soil organic carbon pool and its affecting factors in farmland ecosystem. *Chinese Journal of Ecology*, 26, 278–285. (in Chinese with English abstract) [姜勇, 庄秋丽, 梁文举 (2007). 农田生态系统土壤有机碳库及其影响因子. *生态学杂志*, 26, 278–285.]
- Jiang YM, Peng FT, Zhang HY, Li XL, Zhang FS (2001). Status of organic matter and nutrients in Shandong orchard soils. *Chinese Journal of Soil Science*, 32(4), 167–169. (in Chinese with English abstract) [姜远茂, 彭福田, 张宏彦, 李晓林, 张福锁 (2001). 山东省苹果园土壤有机质及养分状况研究. *土壤通报*, 32(4), 167–169.]
- Jiang YM, Zhang HY, Zhang FS (2007). *The Northern Deciduous Fruit Trees of Nutrient Resource Integrated Management Theory and Practice*. China Agricultural University Press, Beijing, 27–30. (in Chinese) [姜远茂, 张宏彦, 张福锁 (2007). 北方落叶果树养分资源综合管理理论与实践. 中国农业大学出版社, 北京. 27–30.]
- Li TZ, Zhang ZH (2008). *Modern Fruit Biology*. Science Press, Beijing, 157–159. (in Chinese) [李天忠, 张志宏 (2008). 现代果树生物学. 科学出版社, 北京. 157–159.]
- Li XL, Ye XF, Gu JG, Li YT, Ma JS, Liu GS (2011). Effect of soil C:N ratio on activity of key enzymes involved in carbon and nitrogen metabolism and quality of flue-cured tobacco leaves. *Acta Tabacaria Sinica*, 17(3), 32–36. (in Chinese with English abstract) [李雪利, 叶协锋, 顾建国, 李彦涛, 马静思, 刘国顺 (2011). 土壤C:N比对烤烟碳氮代谢关键酶活性和烟叶品质影响的研究. *中国烟草学报*, 17(3), 32–36.]
- Li YT, Mi GH, Chen FJ, Lao XR, Zhang FS (2001). Genotypic difference of nitrogen recycling between root and shoot of maize seedlings. *Acta Phytophysiologica Sinica*, 27(3), 226–230. (in Chinese with English abstract) [李燕婷, 米国华, 陈范骏, 劳秀荣, 张福锁 (2001). 玉米幼苗地上部/根间氮的循环及其基因型差异. *植物生理学报*, 27(3), 226–230.]
- Liu C, Tang GY, Tong CL, Xia HA, Jiang P, Lin YH (2008). Evolution characteristics and coupling relationship of soil organic carbon and total nitrogen in subtropical paddy field ecosystem under different fertilization practices. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 19, 1489–1493. (in Chinese with English abstract) [刘畅, 唐国勇, 童成立, 夏海鳌, 蒋平, 林蕴华 (2008). 不同施肥措施下亚热带稻田土壤碳、氮演变特征及其耦合关系. *应用生态学报*, 19, 1489–1493.]
- Liu M, Li ZP, Zhang TL, Jiang CY, Che YP (2011). Discrepancy in response of rice yield and soil fertility to long-term chemical fertilization and organic amendments in paddy soils cultivated from infertile upland in subtropical China. *Agricultural Sciences in China*, 10, 259–266.
- Liu SL, Liu ZJ, Yang QY, Jie XL, Hua DL, Liu F, Yang ZM, Yang X (2007). Effect of different C:N ratio on physiological and biochemical characteristics and chemical components of flue-cured tobacco. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*, 22(6), 161–164. (in Chinese with English abstract) [刘世亮, 刘增俊, 杨秋云, 介晓磊, 化党领, 刘芳, 杨振民, 杨晓 (2007). 外源糖调节不同碳氮比对烤烟生理生化特性及化学成分的影响. *华北农学报*, 22(6), 161–164.]
- Liu ZZ, Wang SM, Yang LL (1995). Study on adjustment of the ratio of C to N by adding N during straw turnover. *Journal of Agricultural University of Hebei*, 18(3), 31–35. (in Chinese with English abstract) [刘斌珍, 王淑敏, 杨丽琳 (1995). 秸秆还田添加氮素调节碳氮比的研究. *河北农业大学学报*, 18(3), 31–35.]
- Lü DQ, Tong YA, Sun BH, Emteryd O (1998). Study on effect of nitrogen fertilizer use on environment pollution. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 4(2), 8–15. (in Chinese with English abstract) [吕殿青, 同延安, 孙本华, Emteryd O (1998). 氮肥施用对环境污染影响的研究. *植物营养与肥料学报*, 4(2), 8–15.]
- Lu SC (2009). *Characteristics of Nutrient Input and the Influences on Soil Quality in Intensive Orchards of China*. PhD dissertation, Chinese Agricultural University, Beijing, 36. (in Chinese) [卢树昌 (2009). 我国集约化果园养分投入特征及其对土壤质量的影响. 博士学位论文, 中国农业大学, 北京. 36.]
- Lu YH, Watanabe A, Kimura M (2002). Input and distribution of photosynthesized carbon in a flooded soil. *Global Biogeochem Cycles*, 16, 321–328.
- Ministry of Agriculture of the people's Republic of China (2011). *China Agricultural Yearbook 2010*. China Agriculture Press, Beijing. (in Chinese) [中华人民共和国农业部 (2011). 中国农业年鉴2010. 中国农业出版社, 北京.]
- Motavalli PP, Miles RJ (2002). Soil phosphorus fractions after 111 years of animal manure and fertilizer applications. *Biology and Fertility of Soils*, 36, 35–42.
- Schipper LA, Sparling GP (2011). Accumulation of soil organic C and change in C:N ratio after establishment of pastures on reverted scrubland in New Zealand. *Biogeochemistry*, 104, 49–58.
- Shu HR (1999). *Apple Science*. China Agriculture Press, Beijing, 428–430. (in Chinese) [束怀瑞 (1999). 苹果学. 中国农业出版社, 北京. 428–430.]
- Shu HR (2003). Development status of fruit industry in China and several problems to be studied. *Engineering Science*, 5(2), 45–48. (in Chinese with English abstract) [束怀瑞

- (2003). 我国果树业生产现状和待研究的问题. 中国工程科学, 5(2), 45–48.]
- Springob G, Kirchmann H (2003). Bulk soil C to N ratio as a simple measure of net N mineralization from stabilized soil organic matter in sandy arable soils. *Soil Biology & Biochemistry*, 35, 629–632.
- Sui YY, Zhang XY, Jiao XG, Wang QC, Zhao J (2005). Effect of long-term different fertilizer applications on organic matter and nitrogen of black farmland. *Journal of Soil and Water Conservation*, 19(6), 190–192, 200. (in Chinese with English abstract) [隋跃宇, 张兴义, 焦晓光, 王其存, 赵军 (2005). 长期不同施肥制度对农田黑土有机质和氮素的影响. 水土保持学报, 19(6), 190–192, 200.]
- Vogeler I, Rogasik J, Funder U, Panten K, Schnug E (2009). Effect of tillage systems and P-fertilization on soil physical and chemical properties, crop yield and nutrient uptake. *Soil and Tillage Research*, 103, 137–143.
- Wang HN, Ge SF, Jiang YM, Wei SC, Peng FT, Chen Q (2012). Growth characteristics and absorption, distribution and utilization of $^{15}\text{NO}_3^-$ -N and $^{15}\text{NH}_4^+$ -N application for five apple rootstocks. *Acta Horticulturae Sinica*, 39, 343–348. (in Chinese with English abstract) [王海宁, 葛顺峰, 姜远茂, 魏绍冲, 彭福田, 陈倩 (2012). 苹果砧木生长及吸收利用硝态氮和铵态氮特性比较. 园艺学报, 39, 343–348.]
- Worku M, Banziger M, Erley GSA, Friesen D, Diallo AO, Horst WJ (2007). Nitrogen uptake and utilization in contrasting nitrogen efficient tropical maize hybrids. *Crop Science*, 47, 519–528.
- Wu HB, Guo ZT, Peng CH (2011). Changes in terrestrial carbon storage with global climate changes since the last interglacial. *Quaternary Sciences*, 21, 366–376. (in Chinese with English abstract) [吴海斌, 郭正堂, 彭长辉 (2011). 末次间冰期以来陆地生态系统的碳储量与气候变化. 第四纪研究, 21, 366–376.]
- Xu JE, Lin YY, Lü RJ, Chen L, Gao ZF (1993). Studies on the absorption and the distribution of ^{15}N -labelled urea to 'Yali' pear trees following autumn application. *Acta Horticulturae Sinica*, 20(2), 145–149. (in Chinese with English abstract) [徐季娥, 林裕益, 吕瑞江, 陈良, 高占峰 (1993). 鸭梨秋施 ^{15}N -尿素的吸收与分配. 园艺学报, 20(2), 145–149.]
- Yang YL, Guo SL, Ma YH, Che SG, Sun WY (2008). Changes of orchard soil carbon, nitrogen and phosphorus in gully region of Loess Plateau. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 14, 685–691. (in Chinese with English abstract) [杨雨林, 郭胜利, 马玉红, 车升国, 孙文艺 (2008). 黄土高原沟壑区不同年限苹果园土壤碳、氮、磷变化特征. 植物营养与肥料学报, 14, 685–691.]
- Zhang CH, Wang ZM, Ju WM, Ren CY (2011). Spatial and temporal variability of soil C/N ratio in Songnen Plain maize belt. *Environmental Science*, 32, 1407–1414. (in Chinese with English abstract) [张春华, 王宗明, 居为民, 任春颖 (2011). 松嫩平原玉米带土壤碳氮比的时空变异特征. 环境科学, 32, 1407–1414.]
- Zhang WL, Tian ZX, Zhang N, Li XQ (1995). Investigation of nitrate pollution in ground water due to nitrogen fertilization in agriculture in North China. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 1(2), 80–87. (in Chinese with English abstract) [张维理, 田哲旭, 张宁, 李晓齐 (1995). 我国北方农田氮肥造成地下水硝酸盐污染的调查. 植物营养与肥料学报, 1(2), 80–87.]

特邀编委: 戴廷波 责任编辑: 李 敏