

DOI: 10.5846/stxb202107101859

王云霓,代海燕,曹恭祥,张慧,梁海荣,桑昊,杨溢文,刘红梅.内蒙古大青山华北落叶松人工林乔木层碳密度年增量与气象因子的关系.生态学报,2022,42(14):5884-5893.

Wang Y N, Dai H Y, Cao G X, Zhang H, Liang H R, Sang H, Yang Y W, Liu H M. Relationship between carbon density increment of larch plantation and climate factors in Daqing Mountains of Inner Mongolia. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(14): 5884-5893.

内蒙古大青山华北落叶松人工林乔木层碳密度年增量与气象因子的关系

王云霓^{1,*}, 代海燕², 曹恭祥¹, 张慧¹, 梁海荣¹, 桑昊¹, 杨溢文¹, 刘红梅¹

1 内蒙古自治区林业科学研究院, 呼和浩特 010010

2 内蒙古自治区生态与农业气象中心, 呼和浩特 010051

摘要:以内蒙古大青山华北落叶松人工林为研究对象,通过树木年轮法和异速生长方程法,计算华北落叶松人工林生物量、碳密度及其年增量的年际变化,并分析碳密度年增量与气温、降水、湿度等气象因子的关系。研究发现:华北落叶松人工林碳密度随着林龄增加的变化曲线可用逻辑斯谛生长方程拟合,在 1979—2016 年,碳密度由 1.05 t/hm² 增加到 76.83 t/hm²。华北落叶松人工林碳密度年增量存在显著的年际差异,总体上呈波动性的“慢-快-慢”趋势,碳密度年增量最高达到 3.72 t hm⁻² a⁻¹,多年平均为 2.05 t hm⁻² a⁻¹。华北落叶松人工林碳密度年增量与上年 6 月和当年 6—8 月的降水量显著正相关,与上年 11 月降水显著负相关;与上年 11—12 月、当年 2 月和 12 月的温度和大气相对湿度分别呈正、负相关;与上年 7 月、9 月及当年 8—9 月的温度保持显著或极显著正相关。研究表明,温度、湿度和降水主要通过生长季的长短和土壤可利用水分及冬季的雪害冻害影响华北落叶松人工林的碳汇潜力,在未来该地区升温增湿的气候变化趋势下华北落叶松人工林的固碳潜力可能会增强。

关键词:年轮;生物量;碳密度;气候因子

Relationship between carbon density increment of larch plantation and climate factors in Daqing Mountains of Inner Mongolia

WANG Yunni^{1,*}, DAI Haiyan², CAO Gongxiang¹, ZHANG Hui¹, LIANG Hairong¹, SANG Hao¹, YANG Yiwen¹, LIU Hongmei¹

1 Inner Mongolia Academy of Forestry Science, Hohhot 010010, China

2 Inner Mongolia Ecology and Agricultural Meteorology Centre, Hohhot 010051, China

Abstract: Larch (*Larix principis-rupprechtii*) plantation is one of the main forest types in Daqing Mountains of the Inner Mongolia, China. To investigate the response of carbon density increment of larch plantation to varying climate factors, five 30×30 m² plots were set up in 43 years larch plantation in Hadamen National Nature Reserve of Daqing Mountains of Inner Mongolia. Diameter at the breast height (DBH) of all trees in the five plots was measured, and forty tree-ring samples at breast height were got in each plot. Then, using dendroecological methods and biomass-DBH growth equations, biomass, carbon density and carbon density increment of larch plantation were calculated, and the relation between carbon density increment with climatic factors, including monthly precipitation, monthly temperature (monthly mean temperature, monthly mean minimum temperature, monthly mean maximum temperature), and monthly mean humidity was analyzed. The results indicated that the variation of carbon density followed the logistic equation as the increase of forest age, and the larch

基金项目:内蒙古自治区关键技术攻关计划项目(2021GG0033);内蒙古自治区自然科学基金项目(2021MS03101)

收稿日期:2021-07-10; **网络出版日期:**2022-03-23

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: yunni5186@126.com

plantation carbon density increased from 1.05 t/hm^2 in 1979 to 76.83 t/hm^2 in 2016. The carbon density increment of larch plantation showed a trend of “slow-fast - slow” with the increasing forest age, with a mean carbon density increment value of $2.05 \text{ t hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$ and a maximum carbon density increment value of $3.72 \text{ t hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$. The carbon density increment was closely correlated with climatic factors. The carbon density increment of larch plantation was significantly and positively correlated with the monthly precipitation in June of previous year and that from June to August of current year, but negatively correlated with December in previous year. The carbon density increment of larch plantation was significantly and positively correlated with the temperature from November to December of the previous year and February, December of current year, but significantly and negatively correlated with humidity in those months. There was positive correlation between carbon density increment and the monthly temperature in July, September of the previous year and August—September of current year. In general, annual varying of carbon density increment of larch plantation was mainly affected by temperature, humidity and precipitation, which were primarily through influenced the growing season length, the relative extractable soil water in growing season and freezing injury and snow damage in winter. It is implied that the carbon density increment of larch plantations would present an increasing trend in the future due to the warmer and humid climate condition in the research region.

Key Words: tree ring; biomass; carbon density; climate factor

气候变化对森林生态系统的分布格局、结构组成、生理特性、物质循环等产生深刻影响^[1-3],已有众多研究发现气候变化对森林造成极大影响。如:生长分异^[4-5]、森林演替、林分衰退及死亡率增加^[6-9]、固碳能力降低^[10-11],甚至成为碳源^[12-13]。生物量碳密度是用于评价森林生态系统的固碳增汇功能最常用指标^[14-15],碳密度的年际变化可用于指示气候变化对森林固碳能力的影响^[16-18],已有相关研究主要集中在碳密度的静态比较^[19-20]、森林生态系统碳密度组成特征^[21-22]、大尺度上基于遥感数据、资源数据和模型计算分析碳密度^[15,23-24]等方向,也有少量生物量碳密度对气候因子的响应研究。如:王云霓等^[16]对宁夏六盘山不同气候区华北落叶松(*Larix principis-rupprechtii*)人工林、于健等^[17]对长白山红松(*Pinus koraiensis*)林、曹恭祥等^[18]对红花尔基沙地樟子松(*Pinus sylvestris* var. *mongolica*)人工林的研究中均利用年轮宽度推算碳密度及其增量的年际变化。但受树种、群落结构、水热条件、经营措施等影响,森林植被的固碳能力表现出明显的种间差异和时空异质性^[14-15]。在气候变化背景下,基于森林碳汇功能进行森林经营或精细化管理时,就需要全面理解气象因子对不同地区、不同树种的碳汇能力的影响。

华北落叶松抗逆性强,是优质速生的用材树种,也是涵养水源、固碳释氧、调节气候的主要造林树种,在华北各地、阴山、贺兰山、六盘山、祁连山、天山、秦岭山、九江庐山等地区均有分布。处在半湿润向半干旱、干旱过渡气候区的内蒙古大青山,是黄河流域重要的水源涵养地,此地区的植被对稳定大黑河、小清河、黄河的水量和减小水土流失、控制水质水患及呼和浩特、包头、乌兰察布等地区的固碳释氧、降温增湿具有重要的生态影响。华北落叶松自 20 世纪 60 年代开始引入内蒙古大青山,生长良好。

在全球气候变化的背景下,内蒙古大青山华北落叶松人工林碳密度的时间变化格局及其与气象因子的关系,这在我国阴山地区森林、灌丛-草原植被过渡带上森林植被固碳特征的研究中还未见报道。因此,本文以阴山中段的内蒙古大青山华北落叶松人工林为研究对象,基于年轮宽度,结合解析木的方法,计算华北落叶松人工林碳密度及其年增量的动态变化,并分析碳密度年增量对气象要素的响应特征,为探索全球气候变化下阴山地区碳平衡特征及人工林固碳功能的深入研究提供基础,同时对认识气候变化对森林草原过渡带的影响具有重要意义。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

本研究的采样点位于内蒙古大青山国家级自然保护区,介于 $40^{\circ}34'—41^{\circ}14'N$, $109^{\circ}47'—112^{\circ}17'E$,处在

半湿润区向干旱半干旱区及森林、灌丛—草原植被的过渡地带。冬季寒冷;春秋短暂,风大;夏季多雨、温凉,相对湿润。研究区 1960—2019 年气候数据(图 1)显示:在全球变暖的背景下,研究区年均气温呈明显的上升趋势,多年平均气温 3.25 °C,年均气温最高为 5.80 °C,出现在 2007 年;年均气温最低为 1.55 °C,出现在 1967 年;最冷出现在 12 月;极端最高气温 33.6 °C,最热出现在 7 月;近 60 年的平均相对湿度为 53.51%,年均大气相对湿度最高为 64.00%,出现在 2003 年;60 年间年降水整体呈增加趋势,最大值出现在 1961 年(553.10 mm),多年平均为 351.09 mm,每年 6—8 月的降水量最大;年均风速为 3.20 m/s,年日照时数平均为 2947.10 h,年蒸发量为 1846.8 mm。

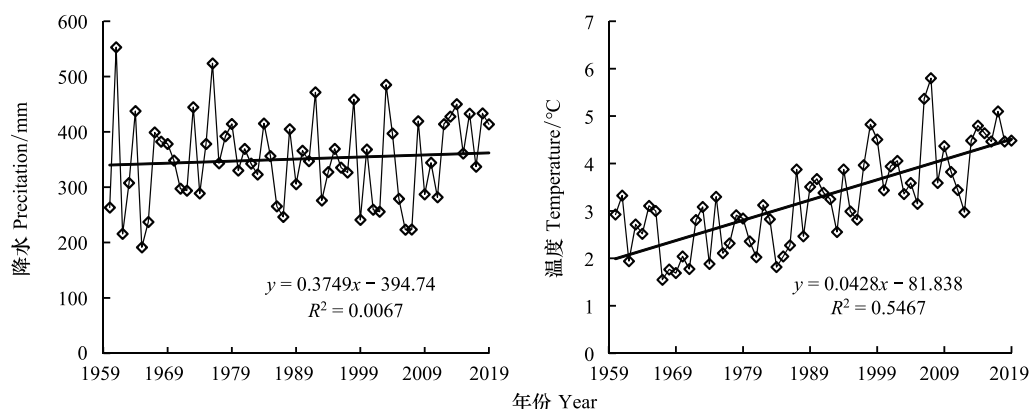


图 1 近 60 年间(1960—2019 年)降水和温度的年际变化

Fig.1 Interannual variation of precipitation, and temperature from 1960 to 2019

保护区华北落叶松多为人工纯林,在阴坡凹地或者坡下伴有白桦(*Betula platyphylla*)、蒙古栎(*Quercus mongolica*)、山杨(*Populus davidiana*)等树种,华北落叶松林人为干扰较少。灌丛以三裂绣线菊(*Spiraea trilobata*)、山刺玫(*Rosa davurica*)、蒙古荚蒾(*Viburnum mongolicum*)、虎榛子(*Ostryopsis davidiana*)、达乌里胡枝子(*Lespedeza davurica*)为主;草本有羊草(*Leymus chinensis*)、翠菊(*Callistephus chinensis*)、百蕊草(*Thesium chinense*)、翻白繁缕(*Stellaria discolor*)、蒲公英(*Taraxacum mongolicum*)、地榆(*Sanguisorba officinalis*)、蕨(*Pteridium aquilinum*)、克氏针茅(*Stipa krylovii*)、小红菊(*Dendranthema chanelii*)、西伯利亚乌头(*Aconitum barbatum* var. *hispidum*)、百里香(*Thymus mongolicus*)、东方草莓(*Fragaria orientalis*)、米口袋(*Gueldenstaedtia multiflora*)等。土壤呈微酸性,质地以棕壤、褐土等为主。

1.2 样地设置

本研究中华北落叶松林 5 个 30 m×30 m 调查样地(P_1 、 P_2 、 P_3 、 P_4 、 P_5 ,表 1)分布在北坡,林龄均为 43 a,是研究区保存最好、林龄相对较大的华北落叶松纯林。对乔木进行每木编号、调查,林下灌木每丛调查;在每个样地对角线机械设置 5 个草本样方,并记录海拔、坡度等立地因子,样地的基本特征见表 1。

P_1 与 P_5 对应海拔差 24.0 m,海拔差相对较小,可以忽略海拔导致的立地条件微差异。5 个样地的土壤均为山地灰褐土,土壤厚度大于 100 cm,样地林分密度为 1056—1366 株/hm²;样地平均胸径和平均树高的最大值分别为 17.70 cm 和 13.64 m,最小值分别为 16.57 cm 和 12.97 m;郁闭度相近,变化范围为 0.70—0.80。受林分郁闭度的影响,林下灌木零星分布或无, P_1 、 P_2 样地林下均没有灌木, P_3 样地林下灌木有 8 丛多花胡枝子(*Lespedeza floribunda*)、2 丛土庄绣线菊(*Spiraea pubescens*), P_4 样地林下灌木有 3 丛胡枝子、2 丛土庄绣线菊、1 丛水栒子(*Cotoneaster multiflorus*), P_5 样地林下灌木有 2 丛水栒子、1 丛土庄绣线菊。草本层盖度为 58%—70%,样地间的草本种类基本相同,主要有:地榆、东方草莓、歪头菜(*Vicia unijuga*)、蒲公英和老鹳草(*Geranium wilfordii*)。

表 1 华北落叶松人工林样地基本特征

Table 1 The basic characteristics of larch plantation plots

样地编号 Plot No.	P ₁	P ₂	P ₃	P ₄	P ₅
林龄 Age	43	43	43	43	43
海拔 Altitude/m	2013	2011	2005	1998	1989
坡度 Slope degree/(°)	7.0	8.2	7.5	8.3	10.1
密度 Density/(株/hm ²)	1366	1179	1121	1056	1332
胸径 Diameter at breast height/cm	16.57±4.76	17.53±4.77	16.60±5.59	17.70±5.88	17.33±4.78
树高 Height/m	12.97±2.34	13.64±2.52	13.30±2.38	13.19±2.77	13.62±2.33
郁闭度 Canopy density	0.70	0.80	0.78	0.75	0.76
灌木优势种 Dominant shrub species	—	—	多花胡枝子 (<i>Lespedeza floribunda</i>)		水栒子 (<i>Cotoneaster multiflorus</i>)
草本优势种 Dominant herbage species	地榆(<i>Sanguisorba officinalis</i>)		东方草莓(<i>Fragaria orientalia</i>)		
草本层盖度 herbaceous coverage/%	68	65	58	62	70

P₁、P₂、P₃、P₄、P₅:样地编号 Plot number

1.3 树芯取样和年轮宽度测定

每个样地按径级分布比例选择标准木 20 株,在胸高处垂直交叉钻取 2 根树芯,风干后固定、打磨、扫描,使用 WinDENDRO 分析系统进行交叉定年和测量,利用 COFECHA 程序^[25]对测量结果和定年准确性进行质量控制,合格后获得年轮宽度(精度为 0.01 mm)数据。

1.4 生物量估算

首先,基于标准木胸径(D_{2016} ,cm)、垂直交叉方向的年轮宽度(d_n ,cm),通过公式(1)计算得出历年胸径 D_n ($0 \leq n < 2016$)。其次,基于样地外华北落叶松 16 株解析木数据建立单株的干、枝、叶、皮等不同器官生物量(W ,kg)与胸径(D ,cm)的函数关系,计算不同器官历年的生物量,具体见公式(2)~(5);根据单株根系生物量($W_{\text{根}}$,kg)与胸径、树高(H ,m)的数量关系计算历年的根系生物量^[26],见公式(6)。

$$D_n = D_{2016} - d_n \quad (1)$$

式中, $d_n = d_{2016} + d_{2015} + \dots + d_{n+1} + d_{n+2}$

$$W_{\text{干}} = 3.2966D^{0.1587} \quad (R^2 = 0.8732) \quad (2)$$

$$W_{\text{枝}} = 2.4363D^{0.1473} \quad (R^2 = 0.9235) \quad (3)$$

$$W_{\text{叶}} = 1.0121D^{0.1161} \quad (R^2 = 0.8370) \quad (4)$$

$$W_{\text{皮}} = 0.9136D^{0.1422} \quad (R^2 = 0.8495) \quad (5)$$

$$W_{\text{根}} = 0.8247 \ln(D^2 H) - 4.2346 \quad (R^2 = 0.972) \quad (6)$$

1.5 碳含量测定

每个径级选择 4 株标准木,在树冠的上部、中部、下部位位置的东、西、南、北 4 个方向分别取干、枝、叶、皮等不同器官的植物样;选择与平均胸径接近的 1 株样树,对根系进行全挖,分别对 ≤ 0.2 cm 的细根、0.2—2 cm 的中根和 > 2 cm 的粗根进行取样;相同器官样品等量混合后烘干、粉碎、过筛。含碳率采用重铬酸钾-硫酸氧化法测定。

1.6 碳密度及其年增量的估算

基于华北落叶松的干、枝、叶、皮、根等不同器官的生物量(W ,t/hm²)与有机碳含量(R)计算得到碳密度(CD ,t/hm²),见公式(7):

$$CD = \left(\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n (W_j \times R_j) \right) / (S \times 1000) \quad (7)$$

式中, CD 是碳密度(t/hm²), m 表示样地内树的株数, n 表示单株的干、枝、叶、皮、根等不同器官。

根据公式(8)计算碳密度年增量($CDI, t\ hm^{-2}\ a^{-1}$)^[18]。

$$CDI_k = CD_k - CD_{k-1} \quad (8)$$

式中, CD_k 是第 k 年的碳密度(t/hm^2), k 表示年份。

1.7 气象数据获取与数据处理

在内蒙古自治区生态与农业气象中心获得研究区多年的气象数据,包括气温、最低温、最高温、降水量和相对湿度等气象因子的月值;考虑到前一年气象因素对次年碳密度年增量的影响^[18],在 SPSS 18 利用 Pearson 相关分析气象因子对华北落叶松人工林碳密度年增量的影响时,选择气象指标的时长为 1979 年 6 月到 2016 年 12 月。

数据处理是在 Excel 2010 和 SPSS 18 统计软件里完成的,选择单因素方差分析(one-way ANOVA)比较参数间的差异,取 $P < 0.05$ 为差异显著, $P < 0.01$ 为差异极显著。

2 结果与分析

2.1 碳密度的年际变化

华北落叶松不同器官的含碳率存在差异(图 2),叶与干、枝、皮之间是极显著差异($P < 0.01$),根与叶、干、枝、皮之间呈显著性差异($P < 0.05$),而干、枝、皮之间差异不显著。皮和干的平均含碳率最高,分别为 55.22% 和 55.13%;枝的平均含碳率次之(54.36%),根的平均含碳率低于枝的,为 52.47%,叶的平均含碳率(51.22%)最低。

华北落叶松人工林碳密度的年际变化如图 3 所示。碳密度随着林龄的增加先缓慢增加后快速增加,两者之间的关系可以用 Logistic 方程描述,1979—2016 年间华北落叶松人工林碳密度从 $1.05\ t/hm^2$ 增加到 $76.83\ t/hm^2$,近 38 年间增长超过了 73 倍,说明华北落叶松生长较快,固碳速率较快,增汇功能强。从生物量固碳和提供木材角度来看,在内蒙古大青山人工造林时,可以选择华北落叶松。

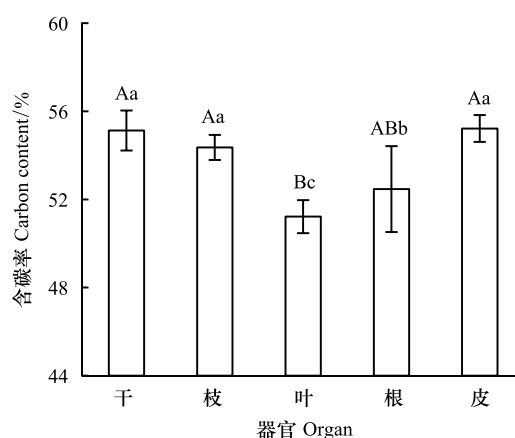


图 2 华北落叶松干、枝、叶、根、皮的含碳率

Fig. 2 Carbon content in stem, branch, leaf, root, bark of larch tree

不同大写字母表示差异极显著($P < 0.01$),不同小写字母表示差异显著($P < 0.05$);图中数据为平均值 $\pm$ 标准差

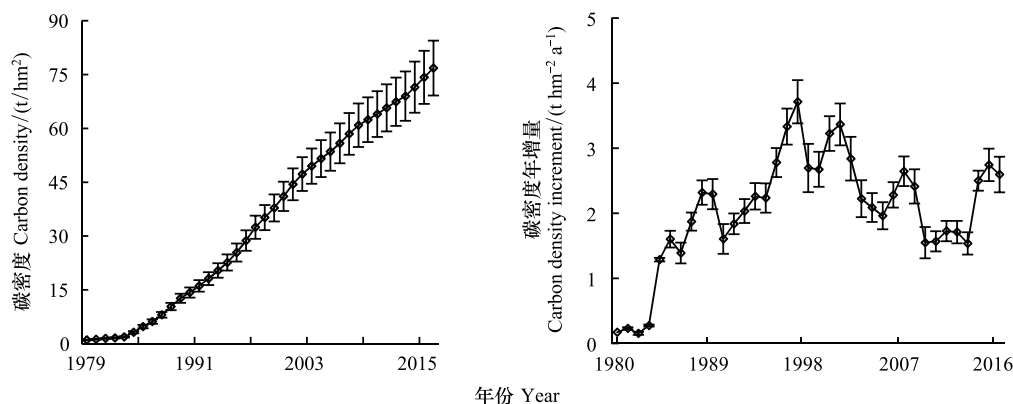


图 3 不同年份华北落叶松林的碳密度和碳密度年增量

Fig. 3 Carbon density and its increment of larch plantation in different year

2.2 碳密度年增量的年际变化

华北落叶松林碳密度增长速度上总体表现出“慢-快-慢”的波动趋势,但年际间波动存在差异,见图 3。在 1980—1997 年期间,碳密度年增量快速上升,但在上升中又有波动;1997 年碳密度年增量达到 $3.72 \text{ t hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$;1997—2001 年间碳密度年增量保持较高的水平,之后碳密度年增量呈波动性降低趋势,降低到 2009 年的 $1.55 \text{ t hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$;2009—2013 年碳密度年增量基本维持不变,变化范围 $1.54\text{—}1.73 \text{ t hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$;在 2013 年之后呈现波动上升的趋势。38 年碳密度年增量平均值为 $2.05 \text{ t hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$,变异系数为 0.42。

2.3 碳密度年增量对气象因子的响应

华北落叶松林碳密度年增量与气象因子的相关性见图 4。碳密度年增量与上年 6 月及当年 6—8 月的降水保持显著 ($P<0.05$) 正相关的关系,说明生长季降水对华北落叶松林固碳功能的影响较大;与上年 11 月的降水保持显著 ($P<0.05$) 负相关,与当年冬季 (11—12 月) 的降水也呈负相关,虽然相关系数没有达到显著性,但相关系数较大,说明冬季降水对当年及次年的林分碳密度年增量的影响较大。碳密度年增量与上年及当年生长季 (5—9 月) 的大气相对湿度保持正相关,但与上年 10 月到次年 4 月、当年 10—12 月的大气相对湿度保

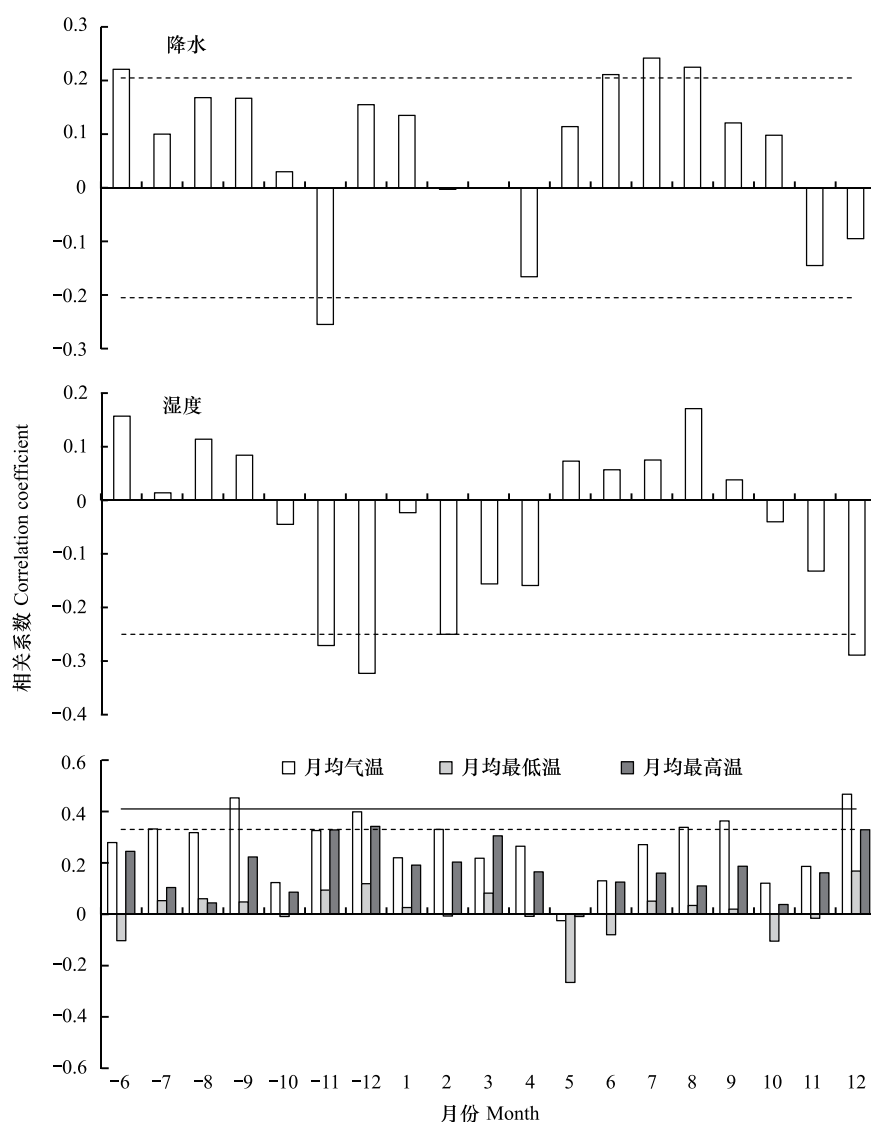


图 4 华北落叶松林碳密度年增量与月份气象因子的相关系数

Fig.4 Correlation coefficients between annual carbon density increment of larch plantation and monthly meteorological factors

虚线表示相关分析显著性水平线 ($P<0.05$),实线表示相关分析极显著性水平线 ($P<0.01$),月份前的“-”为前一年

持负相关,尤其上年 11—12 月、当年 2 月和 12 月的大气相对湿度显著影响着碳密度年增量。碳密度与上年 11—12 月、当年 12 月的月均温和月均最高温均呈显著 ($P < 0.05$) 或极显著 ($P < 0.01$) 的相关关系,与上年 7 月、9 月及当年 2 月、8—9 月的月均温呈显著或极显著正相关,相关系数均大于 0.33。

3 讨论

3.1 华北落叶松林的碳密度特征

研究区 43 a 华北落叶松林的碳密度是 76.83 t/hm^2 , 远高于我国森林植被生物量碳密度 (55.7 t/hm^2)^[21] 和全国落叶松林 (60.2 t/hm^2)^[27], 说明大青山华北落叶松人工林是碳汇的库; 也高于六盘山北侧半干旱气候区 31 a 的 (34.45 t/hm^2)^[16]、山西省太岳山好地方林场 31 a 的 (54.06 t/hm^2)^[28]、大兴安岭南段赛罕乌拉 32 a 的 (26.46 t/hm^2)^[29]、河北省木兰林管局新丰林场 32 a 的 (42.37 t/hm^2)^[30] 华北落叶松人工林乔木层生物量碳密度; 但低于河北阴河林场 38 a 华北落叶松人工林的生物量碳密度 (112.90 t/hm^2)^[31], 与六盘山南侧半湿润 33 a 华北落叶松林碳密度 (74.10 t/hm^2) 相近^[16]。以上研究中计算方法均是基于生物量与胸径的数量关系及含碳率估算乔木层生物量碳密度, 造成差异的原因可能与林分结构、立地条件、气候等有关。如: Ahmad 等^[22]、舒洋等^[29]、马长明等^[30] 和张田田等^[31] 研究均认为: 华北落叶松林生物量碳密度随着林龄的增加而增大; 王云霓等^[16] 认为华北落叶松人工林乔木层生物量碳密度随林龄、林分密度、树高、胸径、郁闭度等林分结构的增加而增加, 且不同气候区华北落叶松林生物量碳密度及年增量存在显著差异; Guo 等^[32] 发现森林植被类型、林龄及研究区气候、土壤等因素的组合是造成林分尺度森林碳密度差异的主要原因; 王建等^[33] 对青藏高原高寒区阔叶林、沈彪等^[34] 对秦岭中段南坡油松林的研究均认为固碳速率受坡度、海拔等地形因子的影响。

受水热条件的影响, 不同地区华北落叶松林固碳能力存在差异, 已有研究中平均碳密度年增量/年固碳速率为: 六盘山南侧香水河小流域 ($5.57 \text{ t hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$)^[16]、河北阴河林场 ($2.97 \text{ t hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$)^[31]、六盘山北侧叠叠沟小流域 ($2.58 \text{ t hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$)^[16]、山西省太岳山好地方林场 ($1.74 \text{ t hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$)^[28]、河北省木兰林管局新丰林场 ($1.32 \text{ t hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$)^[30]、大兴安岭南段赛罕乌拉 ($0.83 \text{ t hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$)^[29]。本研究中, 近 38 年间华北落叶松人工林生物量碳密度年增量最高达到 $3.72 \text{ t hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$, 多年平均碳密度年增量为 $2.05 \text{ t hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 。总体看, 内蒙古大青山华北落叶松人工林的碳密度年增量相对较低, 可能因为研究区处在半干旱半湿润气候区的交错带, 年降水量仅 343.64 mm, 不能满足生长需求, 土壤层储水能力差, 树木在生长季受水分胁迫, 生长季温度相对较低, 生长期相对较短, 导致华北落叶松生长相对较慢, 碳密度年增量相对较小。

3.2 气象因素对碳密度年增量的影响

前人关于碳密度年增量与降水关系的研究结论并不一致。如: 曹恭祥等^[18] 对红花尔基樟子松人工林的研究发现年固碳速率与前一年 12 月和当年 3 月的月降水量达到显著相关, 与生长季降水的关系不密切; 而牛春梅等^[35] 研究则认为: 降水量是限制黄土高原刺槐人工林碳密度的主要因子; Tang 等^[21] 对我国陆地生态系统碳库的研究发现, 水分的可利用性是影响干旱地区生态系统碳储量的主要原因。本研究中, 华北落叶松林碳密度年增量与上年 6 月和当年 6—8 月的降水量显著正相关, 与上年 11 月的降水显著负相关。这主要因为研究区年降水量较少, 且主要分布在 6—8 月, 而 6 月平均气温达到 17°C 以上, 最高气温回升到 23°C 以上, 水热同期使树木形成层细胞分裂迅速, 此时较多的降水和适宜的温度, 可以满足树木生长需求, 有利于增大其固碳潜力。本研究中华北落叶松林碳密度年增量与 6—8 月温度和降水的相关性均较高就是例证, 所以生长季降水量和温度是影响研究区华北落叶松林碳密度年增量的主要因素。11 月降水常以固、液态混合形式, 如果此时降水天气较多, 湿度增大, 而此时温度低于 0°C , 极易结冰, 形成冻害; 12 月至次年 2 月的降水以固体形式为主, 降雪对树木造成物理影响小于其为次年提供水分的影响, 但降雪天气增加大气湿度, 降低温度, 不利于树木过冬, 故冬季大气相对湿度与碳密度年增量呈显著负相关关系。

本研究中华北落叶松林碳密度年增量与各月温度指标大多表现为正相关, 尤其生长季 7—9 月和冬季

(11—12 月、2 月)的温度显著影响着华北落叶松林碳密度年增量。这与前人研究基本一致,如:罗磊等^[36]研究认为:阿尔泰山落叶松林的碳密度与气温呈正相关;杨凤萍等^[37]对秦岭油松和华山松、成泽虎等^[38]对北京油松天然林的研究均发现:乔木层生物量增量与生长季温度呈正相关。但也有研究发现碳密度年增量与生长季温度呈负相关,如曹恭祥等^[18]发现樟子松人工林碳密度年增量与 5—10 月的月均气温、月均最低温和月均最高温均呈负相关,特别上一年 7 月、9 月及当年 8—9 月温度显著或极显著影响碳密度年增量。以上不同结论可能与树种特性、水热条件、林分结构等因素有关。如:Tang 等^[21]研究发现,森林、灌丛和草地的碳库的分布格局与降水、温度的空间分布格局一致;Ahmad 等^[22]研究认为华北落叶松林生物量碳密度随着林分密度、郁闭度的增大而增加;牛春梅等^[35]认为林龄、降水量是影响黄土高原中西部刺槐人工林生态系统碳密度的主要因素。此外,本研究中华北落叶松林碳密度年增量与 5 月平均气温是负相关关系,这在曹恭祥等^[18]、程瑞梅等^[39]的研究中也有发现。生长季初期的 5 月,树木形成层细胞分裂迅速期,树木开始萌动生长,此时较高温度造成林地蒸散耗水增大,但春季降水较少,土壤水分得不到补充,不利于树木生长。相关研究也发现温度升高引起的干旱胁迫进而影响树木生长。如:Buermann 等^[40]对欧亚北方森林的、Schuster 和 Oberhuber^[41]对奥地利中部地区针叶混交林的、Yu 等^[4]对长白山低海拔地区红松(*Pinus koraiensi* Sieb. et Zucc.)、Mäkinen 等^[42]对芬兰南部地区的挪威云杉(*Picea abies*(L.) Karst)及曹恭祥等^[18]、张先亮等^[43]、姜凤岐等^[44]对樟子松的研究均显示:温度升高引起的干旱胁迫或生理干旱是树木生长受限的主要原因。6—8 月是华北落叶松生长旺盛期,此时丰富的降水能够满足华北落叶松生长的需求,而此时温度升高可以加快光合作用,有利于积累光合产物,增强碳汇功能,所以本研究中华北落叶松林净初级生产力与 6—8 月的温度、降水相关性均较高;9 月是研究区树木生长的结束月,较高的温度、适量降水能延长生长季和增加光合产物的积累,也有利于树木安全过冬;而研究区 11—12 月气温对华北落叶松林碳密度年增量的影响需要结合降水形成的雪害及冻害,冬季较高的温度可以避免冻害,也利于提高土壤温度,延长生长期,增加树木增汇能力。

4 结论

本文利用解析木和年轮生态学的方法,研究了内蒙古大青山华北落叶松人工林乔木层碳密度、碳密度年增量及其与气象因子的关系。结果表明:随着林龄的增加,华北落叶松人工林碳密度增加,两者变化关系可用逻辑斯蒂方程描述;38 年间(1979—2016 年)华北落叶松人工林碳密度从 1.05 t/hm²增加到 76.83 t/hm²。华北落叶松人工林碳密度年增量年际差异较大,总体上呈波动的“慢—快—慢”趋势,碳密度年增量的多年平均值为 2.05 t hm⁻² a⁻¹,最大值为 3.72 t hm⁻² a⁻¹。气象因素是影响固碳速率年际变化的主要原因,主要受上年 6 月、11 月及当年 6—8 月的降水、冬季(11—12 月、2 月)的温湿度和上年及当年 9 月、上年 7 月、当年 8 月气温的影响,即生长季中后期的温度决定的生长季长短、生长季的降水决定的土壤可利用水分、冬季温湿度决定的冻害雪害是影响内蒙古大青山华北落叶松人工林碳密度年增量的主要因素。根据中国及研究区气候变化的趋势来看,研究区的大气温度将会升高,降水将增加,水热条件将更加优越且生长季将延长可能会提高研究区华北落叶松的固碳功能,但年内尺度上气候变暖变湿的时间变化格局及降水、干旱等异常气候事件对华北落叶松人工林固碳速率的影响还需要继续追踪研究。

参考文献(References):

- [1] 周国逸,李琳,吴安驰. 气候变暖下干旱对森林生态系统的影响. 南京信息工程大学学报:自然科学版, 2020, 12(1): 81-88.
- [2] Albrich K, Rammer W, Seidl R. Climate change causes critical transitions and irreversible alterations of mountain forests. *Global Change Biology*, 2020, 26(7): 4013-4027.
- [3] Scherrer D, Vitasse Y, Guisan A, Wohlgemuth T, Lischke H. Competition and demography rather than dispersal limitation slow down upward shifts of trees' upper elevation limits in the Alps. *Journal of Ecology*, 2020, 108(6): 2416-2430.
- [4] Yu D P, Liu J Q, Lewis B J, Zhou L, Zhou W M, Fang X M, Wei Y W, Jiang S W, Dai L M. Spatial variation and temporal instability in the climate—growth relationship of Korean pine in the Changbai Mountain region of Northeast China. *Forest Ecology and Management*, 2013, 300:

- 96-105.
- [5] Jiang Y, Zhang W T, Wang M C, Kang M Y, Dong M Y. Radial growth of two dominant montane conifer tree species in response to climate change in North—Central China. *PLoS One*, 2014, 9(11): e112537.
- [6] Moos C, Guisan A, Randin C F, Lischke H. Climate change impacts the protective effect of forests; a case study in Switzerland. *Frontiers in Forests and Global Change*, 2021, 4: 682923.
- [7] Bebi P, Seidl R, Motta R, Fuhr M, Firm D, Krumm F, Conedera M, Ginzler C, Wohlgemuth T, Kulakowski D. Changes of forest cover and disturbance regimes in the mountain forests of the Alps. *Forest Ecology and Management*, 2017, 388: 43-56.
- [8] Liu H Y, Williams A P, Allen C D, Guo D L, Wu X C, Anenkhonov O A, Liang E Y, Sandanov D V, Yin Y, Qi Z H, Badmaeva N K. Rapid warming accelerates tree growth decline in semi-arid forests of Inner Asia. *Global Change Biology*, 2013, 19(8): 2500-2510.
- [9] Liang E Y, Leuschner C, Dulamsuren C, Wagner B, Hauck M. Global warming-related tree growth decline and mortality on the North-eastern Tibetan Plateau. *Climatic Change*, 2016, 134(1/2): 163-176.
- [10] Qin Y W, Xiao X M, Wigneron J P, Ciais P, Brandt M, Fan L, Li X J, Crowell S, Wu X C, Doughty R, Zhang Y, Liu F, Sitch S, Moore B. Carbon loss from forest degradation exceeds that from deforestation in the Brazilian Amazon. *Nature Climate Change*, 2021, 11(5): 442-448.
- [11] Anderegg W R L, Schwalm C, Biondi F, Camarero J J, Koch G, Litvak M, Ogle K, Shaw J D, Shevliakova E, Williams A P, Wolf A, Ziaco E, Pacala S. Pervasive drought legacies in forest ecosystems and their implications for carbon cycle models. *Science*, 2015, 349(6247): 528-532.
- [12] Ciais P, Reichstein M, Viovy N, Granier A, Ogee J, Allard V, Aubinet M, Buchmann N, Bernhofer C, Carrara A, Chevallier F, De Noblet N, Friend A D, Friedlingstein P, Grünwald T, Heinesch B, Keronen P, Knohl A, Krinner G, Loustau D, Manca G, Matteucci G, Miglietta F, Ourcival J M, Papale D, Pilegaard K, Rambal S, Seufert G, Soussana J F, Sanz M J, Schulze E D, Vesala T, Valentini R. Europe-wide reduction in primary productivity caused by the heat and drought in 2003. *Nature*, 2005, 437(7058): 529-533.
- [13] 朴世龙, 张新平, 陈安平, 刘强, 连旭, 王旭辉, 彭书时, 吴秀臣. 极端气候事件对陆地生态系统碳循环的影响. *中国科学: 地球科学*, 2019, 49(9): 1321-1334.
- [14] Ji B Y, Yin J Y, Shi Y J, Xu L, Tao J X, Zhou Y F. Predicting vegetation carbon density distribution in different terrains in subtropical forests in China. *Journal of Sustainable Forestry*, 2021, 40(5): 473-490.
- [15] Zhao M M, Yang J L, Zhao N, Liu Y, Wang Y F, Wilson J P, Yue T X. Estimation of China's forest stand biomass carbon sequestration based on the continuous biomass expansion factor model and seven forest inventories from 1977 to 2013. *Forest Ecology and Management*, 2019, 448: 528-534.
- [16] 王云霓, 曹恭祥, 王彦辉, 熊伟, 于澎涛, 徐丽宏. 宁夏六盘山华北落叶松人工林植被碳密度特征. *林业科学*, 2015, 51(10): 10-16.
- [17] 于健, 罗春旺, 徐倩倩, 孟盛旺, 李俊清, 刘琪璟. 长白山原始林红松径向生长及林分碳汇潜力. *生态学报*, 2016, 36(9): 2626-2636.
- [18] 曹恭祥, 郭中, 王云霓, 季蒙, 韩珊珊, 耿庆春, 冯丽红, 刘海利. 呼伦贝尔沙地樟子松人工林乔木层固碳速率及其对气象因子的响应. *生态学杂志*, 2020, 39(4): 1082-1090.
- [19] Joshi R K, Dhyani S. Biomass, carbon density and diversity of tree species in tropical dry deciduous forests in Central India. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, 39(4): 289-299.
- [20] Jia L Y, Wang G X, Luo J, Ran F, Li W, Zhou J, Yang D L, Shi W B, Xu Q, Zhu K, Yang Y. Carbon storage of the forest and its spatial pattern in Tibet, China. *Journal of Mountain Science*, 2021, 18(7): 1748-1761.
- [21] Tang X L, Zhao X, Bai Y F, Tang Z Y, Wang W T, Zhao Y C, Wan H W, Xie Z Q, Shi X Z, Wu B F, Wang G X, Yan J H, Ma K P, Du S, Li S G, Han S J, Ma Y X, Hu H F, He N P, Yang Y H, Han W X, He H L, Yu G R, Fang J Y, Zhou G Y. Carbon pools in China's terrestrial ecosystems; new estimates based on an intensive field survey. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2018, 115(16): 4021-4026.
- [22] Ahmad B, Wang Y H, Hao J, Liu Y H, Bohnett E, Zhang K B. Variation of carbon density components with overstory structure of larch plantations in northwest China and its implication for optimal forest management. *Forest Ecology and Management*, 2021, 496: 119399.
- [23] Chang Z B, Hobeichi S, Wang Y P, Tang X L, Abramowitz G, Chen Y, Cao N N, Yu M X, Huang H B, Zhou G Y, Wang G X, Ma K P, Du S, Li S G, Han S J, Ma Y X, Wigneron J P, Fan L, Saatchi S S, Yan J H. New forest aboveground biomass maps of China integrating multiple datasets. *Remote Sensing*, 2021, 13(15): 2892.
- [24] Naudiyal N, Schmerbeck J. Potential distribution of oak forests in the central Himalayas and implications for future ecosystem services supply to rural communities. *Ecosystem Services*, 2021, 50: 101310.
- [25] Holmes R L. Computer-assisted quality control in tree-ring dating and measurement. *Tree-Ring Bulletin*, 1983, 43: 69-78.
- [26] 罗云建, 张小全, 王效科, 朱建华, 张治军, 孙贵生, 高峰. 华北落叶松人工林生物量及其分配模式. *北京林业大学学报*, 2009, 31(1): 13-18.
- [27] 周玉荣, 于振良, 赵士洞. 我国主要森林生态系统碳贮量和碳平衡. *植物生态学报*, 2000, 24(5): 518-522.

- [28] 赵敬, 康峰峰, 韩海荣, 程小琴, 李海峰, 朱江, 纪文倩. 山西太岳山 31 年生华北落叶松人工林碳汇功能的研究. 干旱区资源与环境, 2016, 30(10): 110-115.
- [29] 舒洋, 周梅, 赵鹏武, 曾楠, 石亮, 王梓璇, 王鼎, 葛鹏, 张波. 大兴安岭南段华北落叶松人工林碳储量及分配特征研究. 生态环境学报, 2016, 25(10): 1604-1611.
- [30] 马长明, 赵辉, 牟洪香, 刘炳响. 燕山山地华北落叶松人工林碳密度及分配特征. 水土保持学报, 2017, 31(5): 208-214.
- [31] 张田田, 马履一, 贾忠奎, 刘杰, 游伟斌. 华北落叶松幼中龄林的生物量与碳汇功能. 东北林业大学学报, 2012, 40(12): 32-35, 39-39.
- [32] Guo Y R, Peng C H, Trancoso R, Zhu Q A, Zhou X L. Stand carbon density drivers and changes under future climate scenarios across global forests. *Forest Ecology and Management*, 2019, 449: 117463.
- [33] 王建, 王根绪, 王长庭, 冉飞, 常瑞英. 青藏高原高寒区阔叶林植被固碳现状、速率和潜力. 植物生态学报, 2016, 40(4): 374-384.
- [34] 沈彪, 党坤良, 武朋辉, 朱成功. 秦岭中段南坡油松林生态系统碳密度. 生态学报, 2015, 35(6): 1798-1806.
- [35] 牛春梅, 关晋宏, 程然然, 李国庆, 吴春荣, 程积民, 杜盛. 黄土高原中西部刺槐人工林生态系统碳密度及其影响因子. 生态学报, 2017, 37(15): 5049-5058.
- [36] 罗磊, 王蕾, 刘平, 侯晓臣, 高亚琪. 阿尔泰山落叶松林碳储量与生产力时空特征及其气候成因分析. 生态学报, 2019, 39(22): 8575-8584.
- [37] 杨凤萍, 胡兆永, 侯琳, 蔡靖, 崔翠, 张硕新. 秦岭火地塘林区油松和华山松林乔木层净生产力与气候因子的关系. 生态学报, 2014, 34(22): 6489-6500.
- [38] 成泽虎, 丁坤元, 刘艳红. 北京油松天然林和人工林乔木层生产力与气候因子的关系. 南京林业大学学报: 自然科学版, 2016, 40(5): 177-183.
- [39] 程瑞梅, 封晓辉, 肖文发, 王瑞丽, 王晓荣, 杜化堂. 北亚热带马尾松净生产力对气候变化的响应. 生态学报, 2011, 31(8): 2086-2095.
- [40] Buermann W, Parida B, Jung M, MacDonald G M, Tucker C J, Reichstein M. Recent shift in Eurasian boreal forest greening response may be associated with warmer and drier summers. *Geophysical Research Letters*, 2014, 41(6): 1995-2002.
- [41] Schuster R, Oberhuber W. Drought sensitivity of three co-occurring conifers within a dry inner Alpine environment. *Trees*, 2013, 27(1): 61-69.
- [42] Mäkinen H, Nöjd P, Mielikäinen K. Climatic signal in annual growth variation in damaged and healthy stands of Norway spruce [*Picea abies* (L.) Karst.] in southern Finland. *Trees*, 2001, 15(3): 177-185.
- [43] 张先亮, 何兴元, 陈振举, 崔明星, 黎娜. 大兴安岭山地樟子松径向生长对气候变暖的响应——以满归地区为例. 应用生态学报, 2011, 22(12): 3101-3108.
- [44] 姜凤岐, 于占源, 曾德慧, 朱教君. 气候变化对三北防护林的影响与应对策略. 生态学杂志, 2009, 28(9): 1702-1705.