西北植物学报,2020,40(6):1031－1042
Acta Bot. Boreal. -Occident. Sin.

doi:10.7606/j.issn.1000-4025.2020.06.1031 http://xbzwxb.alljournal.net

不同生境胡杨叶片 $\delta^{13}C$ 和 $\delta^{15}N$ 及其对环境因子的响应

哈丽古丽·艾尼[1,2],伊丽米努尔[2*],管文轲[2],阿不都热西提·热合曼[2]

(1 新疆师范大学 生命科学学院,乌鲁木齐 830054;2 新疆林业科学院,乌鲁木齐 830063)

摘　要:以新疆南北疆 8 个不同生境林龄群体的胡杨叶片为材料,测定幼树和成熟胡杨叶片的天然稳定碳、氮同位素组成值($\delta^{13}C$、$\delta^{15}N$)以及碳含量、氮含量和比叶面积,分析叶片 $\delta^{13}C$、$\delta^{15}N$ 值与海拔、经纬度、叶片碳氮含量、比叶面积以及水分利用效率之间的相互关系。结果表明:(1)胡杨幼树和成熟林叶片 $\delta^{13}C$ 平均值分别为－27.863‰(－28.776‰～－26.695‰)和－28.230‰(－29.717‰～－26.033‰),不同生境胡杨叶片间的 $\delta^{13}C$ 值具有显著差异($P<0.05$),并且幼树林叶片 $\delta^{13}C$ 均大于对应成熟林;幼树和成熟林叶片 $\delta^{15}N$ 平均值分别为 3.259‰(－1.842‰～9.082‰)和 3.651‰(0.798‰～5.779‰)。(2)胡杨幼树和成熟林叶片碳含量平均值分别为 46.225‰(44.573‰～49.056‰)和 45.720‰(43.226‰～47.349‰),它们叶片氮含量平均值分别为 1.708‰(1.327‰～2.116‰)和1.823‰(1.164‰～2.450‰);成熟林叶片碳含量与其 $\delta^{13}C$ 和 $\delta^{15}N$ 值分别呈极显著负相关和极显著正相关关系($P<0.01$),而其氮含量与 $\delta^{13}C$ 值呈不显著正相关关系($P>0.05$),与 $\delta^{15}N$ 值呈显著正相关关系。(3)胡杨幼树林叶片的比叶面积平均值(91.565 cm^2/g)小于成熟林叶片(103.141 cm^2/g)。(4)幼树和成熟林胡杨叶片 $\delta^{13}C$、$\delta^{15}N$ 值均与纬度呈极显著正相关关系,幼树林叶片 $\delta^{13}C$、$\delta^{15}N$ 值与海拔也呈极显著正相关关系,幼树林叶片 $\delta^{15}N$ 值与经度也呈显著正相关关系。(5)幼树和成熟胡杨林水分利用率的平均值分别为 77.618 μmol/mol(68.070～91.069 μmol/mol)和 72.463 μmol/mol(62.809～97.111 μmol/mol),不同林龄的胡杨水分利用率均与其叶片$\delta^{13}C$呈极显著正相关关系($P<0.001$),各生境中于田县(阿日系马扎)的幼树和成熟林叶片具有较高的 $\delta^{13}C$ 值(－26.695‰和－26.033‰)和水分利用效率(91.069 和 97.111 μmol/mol)。

关键词:胡杨;稳定碳氮同位素;环境因子;水分利用率;比叶面积

中图分类号:Q948.11　　**文献标志码**:A

Response of Leaf $\delta^{13}C$ and $\delta^{15}N$ and Environmental Factors in Different Habitats of *Populus euphratica*

HALIGULI Aini[1,2], YILIMINUER[2*], GUAN Wenke[2], ABUDOUREXITI Reheman[2]

(1 College of Life Sciences, Xinjiang Normal University, Urumqi 830054, China; 2 Xinjiang Academy of Forestry Science, Urumqi 830063, China)

Abstract: Using the leaves of *Populus euphratica* forest age groups (young trees and mature trees) from eight different habitats in Xinjiang as material, we measured natural stable carbon and nitrogen isotope composition ($\delta^{13}C$ and $\delta^{15}N$) value, carbon content, nitrogen content of leaves and specific leaf area, ana-

收稿日期:2020-03-30;**修改稿收到日期**:2020-06-17

基金项目:塔里木河胡杨保护科技支撑计划(2017)

作者简介:哈丽古丽·艾尼(1995－),女,在读硕士研究生,主要从事植物生态学研究。E-mail:1227826334@qq.com

*通信作者:伊丽米努尔,博士,副研究员,硕士生导师,主要研究方向为林木遗传育种、林木良种选育、森林培育、逆境生理生态。E-mail:1045230278@qq.com

lyzed its $\delta^{13}C$ and $\delta^{15}N$ values with altitude, latitude and longitude, leaf carbon and nitrogen contents, specific leaf area as well as the relationship between water use efficiency. The result showed that: (1) the average $\delta^{13}C$ value of sapling and mature leaves was −27.863‰(−28.776‰ − −26.695‰) and −28.230‰ (−29.717‰ − −26.033‰), respectively. $\delta^{13}C$ values of *P. euphratica* leaves in different habitats were significantly different ($P<0.05$), and $\delta^{13}C$ values of sapling leaves were all greater than those of mature trees. The average $\delta^{15}N$ values of saplings and mature forest leaves were 3.259‰(−1.842‰−9.082‰) and 3.651‰(0.798‰ − 5.779‰), respectively. (2) The variation ranges of carbon content in leaves of saplings and mature forests were 44.573‰ − 49.056‰ and 43.226‰ − 47.349‰, respectively, with an average values of 46.225‰ and 45.720‰. The variation ranges of nitrogen content in young trees and mature forest leaves were 1.327‰ − 2.116‰ and 1.164 − 2.450‰, respectively, with the average values of 1.708‰ and 1.823‰. The content of carbon in mature forest leaves was negatively correlated with its $\delta^{13}C$ value ($P<0.01$), while the content of nitrogen was positively correlated with $\delta^{13}C$ value ($P>0.05$). There was a significant positive correlation between carbon content and $\delta^{15}N$ value in mature forest leaves ($P<0.01$), while there was a significant positive correlation between nitrogen content and $\delta^{15}N$ value ($P<0.05$). (3) The average specific leaf area value of saplings (91.565 cm^2/g) was lower than that of mature trees (103.141 cm^2/g). (4) $\delta^{13}C$ and $\delta^{15}N$ values in leaves of young and mature trees were significantly positively correlated with latitude ($P<0.01$), $\delta^{13}C$ and $\delta^{15}N$ values in leaves of young trees were also significantly positively correlated with altitude ($P<0.01$), and $\delta^{15}N$ value in leaves of young trees was also significantly positively correlated with longitude ($P<0.05$). (5) The average water use efficiencies of young and mature trees were 77.618 μmol/mol (68.070 − 91.069 μmol/mol), 72.463 μmol/mol (62.809 − 97.111 μmol/mol), respectively. The water use efficiencies of young and mature trees were significantly positively correlated with their leaves $\delta^{13}C$ ($P<0.001$), their $\delta^{13}C$ values (−26.695‰ and −26.033‰) and water use efficiencies (91.069 and 97.111 μmol/mol) were the highest in Yutian County.

Key words: *Populus euphratica*; stable carbon and nitrogen isotopes; environmental factors; water use efficiency; special leaf area

叶片是植物的主要光合器官,而且是对环境变化较为敏感的营养器官,其特征能够体现环境因子变化的影响[1]。自然界中物理性质比较稳定、没有放射性和辐射效应的^{12}C、^{13}C为稳定性碳同位素,天然物质的碳同位素组成($\delta^{13}C$)由$^{13}C/^{12}C$比值确定。研究叶片稳定碳同位素组成$\delta^{13}C$,有助于认识植物的水分与碳同化状况,并且常用来指示植物水分利用效率(water use efficiency,WUE)[2-3]。氮是影响和限制植物生长的元素之一[4],而植物叶片氮同位素组成$\delta^{15}N$能反映N的吸收、转运和损失过程中外源N及$\delta^{15}N$、$\delta^{14}N$值的变化[5]。植物$\delta^{15}N$值的差异在一定的时间和空间上能够综合反映氮循环特征[6],可为理解生态系统中的N循环提供有用的信息[7]。此外碳、氮同位素组成在形成过程中能记录物源信息及植物生存的环境变化,因此植物$\delta^{13}C$、$\delta^{15}N$的研究已成为植物生态学和全球碳氮循环研究的核心问题之一[8]。

植物$\delta^{13}C$、$\delta^{15}N$值的差异不仅由植物本身的生物学特性决定,而在很大程度上也受到生长环境的影响,是多因子综合作用的结果,因而在不同环境条件下同种植物的$\delta^{13}C$、$\delta^{15}N$值也存在较大差异[1-8]。由于生长位置(海拔、经纬度)的变化,植物生存环境的水热条件也发生相应的变化,进而直接或间接地影响碳、氮同位素组成[9]。植物叶片$\delta^{13}C$、$\delta^{15}N$值除与环境因素相关外,还与叶片碳、氮含量及比叶面积(special leaf area,SLA)之间存在显著的相关关系[10-13]。叶片的碳、氮元素含量与植物生长对策联系密切[14],而比叶面积是以单位重量的叶面积来表示叶片质量,其体现植物在变化的环境中获取资源的特征,是植物进行碳储存的重要依据[15-16]。

胡杨(*Populus euphratica*)为杨柳科(Salicaceae)杨属(*Populus* L.)胡杨亚属植物[17],能忍受荒漠中干旱的环境,抗热、抗风沙,对盐碱有极强的忍耐力[18-19],在调节绿洲气候方面起到很重要的作用[20-21]。世界上的胡杨绝大部分生长在中国,而中国90%以上的胡杨生长在新疆的塔里木河流域,仅塔里木盆地胡杨保护区的面积就达3800 km^2[22]。近年来,由于大规模的水土开发(开垦)、河流断流、滥砍滥伐等人为和自然因素的影响,导致胡杨林日趋衰败[22-23],并已被列为中国三级重点保护植物[24]。曹生奎等[2]、袁亚鹏等[25]在黑河流域下游的额济纳胡杨林保护区比较了不同样地间的胡杨叶片

$\delta^{13}C$ 值和水分利用效率，马剑英等[26]对塔里木盆地胡杨的两种形态叶片 $\delta^{13}C$ 特征进行了研究，但是胡杨叶片碳、氮同位素组成与环境因子关系方面的研究鲜见报道。因此，本研究以不同生境胡杨叶片为对象，测定其 $\delta^{13}C$、$\delta^{15}N$ 值，探讨不同生境胡杨叶片碳、氮同位素比值与海拔、经纬度等环境因子之间的变异规律及相互关系，阐明不同生境胡杨林木的生物学适应机制和水分利用效率特征，为保护胡杨种质资源和干旱区自然生态系统提供理论依据。

1　材料和方法

1.1　研究区范围及样品采集

2016 年 7 月底在南北疆选择 8 个不同的生境（表 1）采集胡杨叶片以备分析。在每个采集点选择开阔、平坦、与村落较远的区域，以保证生长环境有充足的光照，同时尽可能避免人为活动对其同位素组分的影响。采集点内的胡杨按胸径分组，以胸径 20 cm 为限，将胡杨分幼树（<20 cm）和成熟林木（>20 cm）。采集样株间隔 100 m 以上。在每个地点分别采集幼树和成熟胡杨 8 棵，每棵树随机采集 30 个叶片，然后混合作为 1 个样品。将采集的叶片装入信封带回实验室处理后进行相关指标分析测定。

1.2　植物叶片 $\delta^{13}C$、$\delta^{15}N$ 及碳（C）、氮（N）含量分析测定

将胡杨叶片样品在实验室内用超纯水洗净并自然晾干，置于 70 ℃烘箱至恒重，粉碎至均匀后过 80 目筛制成供试样品。植物叶片 $\delta^{13}C$、$\delta^{15}N$ 及碳（C）、氮（N）含量的测定用 Flash EA1112 元素分析仪-Conflo Ⅲ-Delta Plus 同位素质谱联用仪（Thermo Fisher，Wacldorf，Germany）进行，分析结果均相对于国际标准物质 PDB（Pee Dee River Belemnites Standard），分析精度 ±0.2‰，植物叶片 $\delta^{13}C$ 值依据下面公式进行计算：

$$\delta^{13}C\,(‰,\ \text{V-PDB}) = [(R_{样品}/R_{标准}) - 1] \times 1000‰ \quad (1)$$

$$\delta^{15}N\,(‰,\ \text{at-air}) = [(R_{样品}/R_{标准})/R_{标准}] \times 1000‰ \quad (2)$$

式中，δ 为碳、氮同位素样品相对于国际标准 V-PDB 的同位素分差（PDB 为 Pee Dee Belemnite，国际上通用的碳同位素的标准物质）。$R_{样品}$ 为样品碳、氮元素的重轻同位丰度之比（$^{13}C_{样品}/^{12}C_{样品}$、$^{15}N_{样品}/^{14}N_{样品}$）。$R_{标准}$ 为国际标准物碳、氮元素的重轻同位素丰度之比（$^{13}C_{标准}/^{12}C_{标准}$、$^{15}N_{标准}/^{14}N_{标准}$）。

1.3　水分利用效率计算

不同生境中幼树和成熟胡杨水分利用效率（WUE，μmol/mol）采用如下公式计算：

$$WUE = C_a/1.6 \times (\delta^{13}C_p - \delta^{13}C_a + b)/(b - a) \quad (3)$$

$$\delta^{13}C_a = -6.429 - 0.006\exp[0.0217(t - 1740)] \quad (4)$$

式中，C_a 为大气 CO_2 浓度（约为 0.038%）；$\delta^{13}C_p$ 为叶片样品碳同位素丰度（‰）；$\delta^{13}C_a$ 为大气中稳定碳同位素丰度（‰）；a 为扩散作用所产生的稳定碳同位素分馏值（约为 4.4‰）；b 为羧化反应所产生的稳定碳同位素分馏值（约为 27‰）；t 为样品取样时的公元年份，因本研究取样年份为 2016 年，即将 t=2016 代入（4）式，计算得出：$\delta^{13}C_a = -8.8235712$。

1.4　不同生境胡杨叶片比叶面积测定

比叶面积（specific leaf area，SLA）为叶片的单面面积与其干重之比。用扫描仪（EPSON Expression

表 1　8 个不同胡杨叶片样品采集点基本信息

Table 1　Basic information of 8 sampling sites of *P. euphratica* leaves

生境编号 Habitat code	样品采集点 Sample collection site	海拔 Altitude/m	纬度 Latitude	经度 Longitude
A	墨玉县吉格代库都克管理中心 Moyu county Jigdakuduk management center	1 278	37°34′45.84″	79°38′15.79″
B	艾比湖国家自然保护区 Aibi lake national nature reserve	241	44°39′38.02″	83°20′14.60″
C	甘家湖国家级自然保护区 Ganjiahu national nature reserve	263	44°53′06.47″	83°42′14.60″
D	民丰县尼雅乡托皮村（河边） Topi village，Niya township，Minfeng county（riverside）	1 411	37°04′23.11″	82°38′59.32″
E	民丰县库木恰克力克管护站林区 Minfeng county Kumucha Creek station forest area	1 385	37°12′04.75″	82°54′45.63″
F	于田县（喀尔克）Yutian county（Kalk）	1 395	36°57′07.03″	81°13′46.12″
G	于田县（阿日系马扎）Yutian county（Arixi Mazar）	1 351	37°05′21.47″	82°04′21.25″
H	墨玉县（萨哈里）Moyu county（Sahari）	1 280	37°34′54.53″	79°40′50.34″

10000XL)分别扫描各组叶片,利用 WinRHIZO 分析系统读取每片叶片的单面面积(LA),并按公式(5)计算比叶面积:

$$SLA = \text{叶片面积}(cm^2)/\text{叶片干重}(g) \quad (5)$$

1.5 数据分析

利用 SPSS 19.0 软件对实验数据进行相关性分析和逐步回归分析,数据统计与分析试验结果均以平均值±标准误(SE)表示。采用单因素方差分析(One way ANOVA),对数据进行显著性检验。采用 Excel 2010 软件作图。

2 结果与分析

2.1 不同生境胡杨幼树和成熟林叶片稳定碳、氮同位素组成比较

新疆 8 个不同生境的胡杨幼树和成熟林叶片的 $\delta^{13}C$、$\delta^{15}N$ 值测定结果(表 2)显示,幼树和成熟林叶片碳稳定同位素组成($\delta^{13}C$)变化范围分别为 −28.776‰~−26.695‰和−29.717‰~−26.033‰,平均值分别为(−27.863‰±0.334‰)和(−28.230‰±0.446‰),幼树林叶片高于成熟林叶片;胡杨幼树和成熟林叶片氮稳定同位素组成($\delta^{15}N$)变化范围分别为(−1.842‰~9.082‰)和(0.798‰~5.779‰),平均值分别为(3.259‰±1.419‰)和(3.651‰±0.717‰),幼树林叶片稍低于成熟林叶片。另外,进一步通过单因素方差分析探讨生境对胡杨叶片对稳定性碳、氮同位素组成的影响,结果表明,不同生境间胡杨叶片稳定性碳同位素组成具有显著性差异($F=4.9$,$P<0.05$),而生境间的叶片稳定性氮同位素组成则无显著差异($F=2.833$,$P>0.05$)。

2.2 胡杨幼树和成熟林叶片稳定性碳、氮同位素组成与环境因子的关系

新疆干旱区绿洲胡杨幼树和成熟林叶片稳定碳氮同位素组成与海拔、经纬度间的相关分析结果如图 1 所示。其中,不同生境的胡杨幼树林和成熟林叶片的 $\delta^{13}C$ 值均与海拔间呈极显著正相关关系(R^2

表 2 不同生境幼树和成熟胡杨叶片稳定碳氮同位素组成及相关生理指标

Table 2 Carbon and nitrogen stable isotope compositions and related physiological indexes in leaves of young and mature *P. euphratica* from different habitats

生境 Habitat	树龄 Tree age	$\delta^{13}C$/‰	$\delta^{15}N$/‰	碳含量 Carbon content	氮含量 Nitrogen content	比叶面积 SLA /(cm^2/g)	水分利用效率 WUE /(μmol/mol)
A	幼树 Young trees	−28.736	0.981	45.084	1.327	106.852	68.370
	成熟树 Mature trees	−29.717	4.172	46.470	1.684	100.283	63.086
B	幼树 Young trees	−28.776	5.961	46.628	1.638	98.946	68.070
	成熟树 Mature trees	−28.190	5.779	47.162	1.970	110.082	70.696
C	幼树 Young trees	−28.598	1.925	49.056	2.116	113.459	70.034
	成熟树 Mature trees	−28.540	1.799	47.349	2.450	117.381	69.415
D	幼树 Young trees	−27.153	1.081	45.670	1.762	86.664	86.016
	成熟树 Mature trees	−28.409	0.798	43.226	1.164	93.773	72.129
E	幼树 Young trees	−27.049	5.623	46.222	2.163	94.116	87.153
	成熟树 Mature trees	−27.598	4.348	43.922	1.661	90.243	81.063
F	幼树 Young trees	—	—	—	—	—	—
	成熟树 Mature trees	−29.126	5.714	46.090	2.232	133.363	62.809
G	幼树 Young trees	−26.695	9.082	44.573	1.888	80.166	91.069
	成熟树 Mature trees	−26.033	2.949	44.232	1.849	75.684	97.111
H	幼树 Young trees	−28.037	−1.842	46.311	1.321	91.730	76.243
	成熟树 Mature trees	—	—	—	—	—	—
平均值 Average	幼树 Young trees	−27.863±0.334	3.259±1.419	46.225±0.203	1.708±0.042	91.565±2.157	77.618±1.264
	成熟树 Mature trees	−28.230±0.446	3.651±0.717	45.720±0.179	1.823±0.041	103.141±1.970	72.463±1.359
变异系数 CV/%	幼树 Young trees	−3.18	115.18	4.02	13.89	25.04	14.93
	成熟树 Mature trees	−4.18	51.97	3.98	8.18	19.48	19.13

注:幼树为胸径小于等于 20 cm,成熟树为胸径大于 20 cm;—表示样点无幼树或者无成熟树;表中数据为均值±标准误

Note: Young trees are breast diameter less than or equal 20 cm, Mature trees are breast diameter more than 20 cm; — means there is no young trees or mature trees in the sample site; Values in the table are means ± SE

$=0.4998$，$P<0.01$；$R^2=0.1477$，$P<0.01$），幼树林叶片的 $\delta^{13}C$ 值随着海拔的升高而增大。幼树和成熟林叶片 $\delta^{13}C$ 值均与经度间无显著相关关系（$R^2=0.1972$，$P>0.05$；$R^2=0.0271$，$P>0.05$），均与纬度间呈极显著正相关关系（$R^2=0.1403$，$P<0.01$；$R^2=0.0276$，$P<0.01$），但相关系数值均很小。

图 1 同时显示，不同生境的胡杨幼树林叶片 $\delta^{15}N$ 值与海拔呈极显著正相关关系（$R^2=0.0014$，$P<0.01$），即幼树林叶片的 $\delta^{15}N$ 值随着海拔的升高而增大，而胡杨成熟林叶片 $\delta^{15}N$ 值与海拔无显著相关关系（$R^2=0.0364$，$P>0.05$）；幼树林叶片 $\delta^{15}N$ 值与经度呈显著正相关关系（$R^2=0.0013$，$P<0.05$），但成熟林叶片 $\delta^{15}N$ 值与经度无显著相关关系（$R^2=0.0660$，$P>0.05$）；幼树和成熟林叶片 $\delta^{15}N$ 值与纬度均呈极显著正相关关系（$R^2=0.0225$，$P<0.01$；$R^2=0.2669$，$P<0.01$）。

2.3　胡杨幼树和成熟林叶片碳、氮元素含量及其与 $\delta^{13}C$、$\delta^{15}N$ 的关系

不同生境幼树和成熟林胡杨叶片 C 含量的变化范围分别为 44.573‰～49.056‰ 和 43.226‰～47.349‰，平均值分别为 46.225‰ 和 45.720‰，变异系数分别为 4.02% 和 3.98%，幼树林叶片 C 含量稍高于成熟林叶片；幼树和成熟林叶片 N 含量的变化范围分别为 1.327‰～2.116‰ 和 1.164‰～2.450‰，平均值分别为 1.708‰ 和 1.823‰，变异系数分别为 13.89% 和 8.18%，幼树林叶片的 N 含量稍低于成熟林叶片（表 2）。

图 2 显示，成熟林叶片 C 含量与其 $\delta^{13}C$ 值呈极

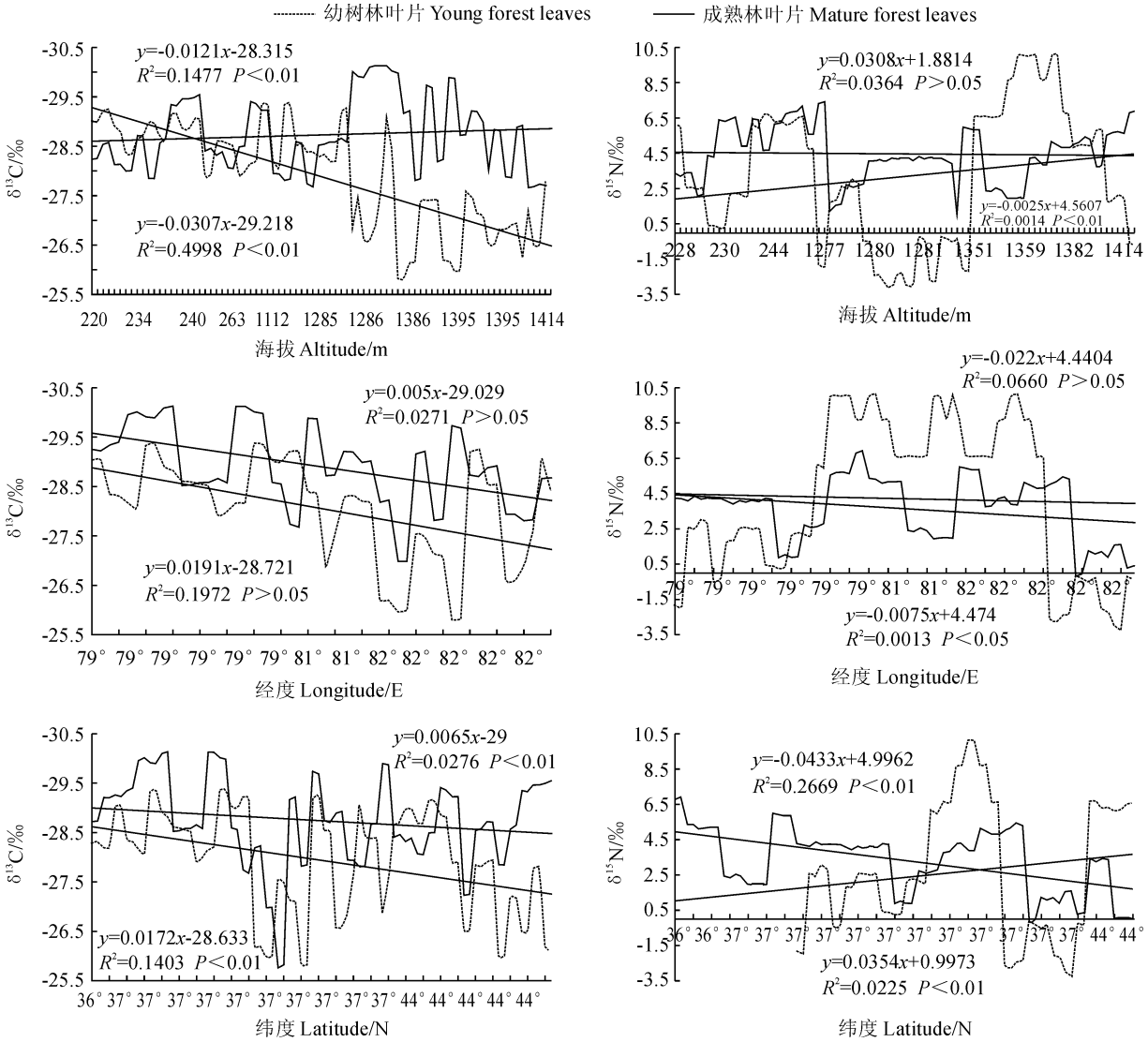

图 1　幼树和成熟林叶片 $\delta^{13}C$、$\delta^{15}N$ 值与海拔、经纬度的关系

Fig. 1　The relationship between the $\delta^{13}C$, $\delta^{15}N$ values in leaves of *P. euphratica* and the elevation, latitude and longitude

显著负相关关系($R^2=0.1700$,$P<0.01$),而其 N 含量与 $\delta^{13}C$ 值呈正相关关系($R^2=0.0020$,$P>0.05$),但未达到显著水平;成熟林叶片 C 含量与 $\delta^{15}N$ 值呈极显著正相关关系($R^2=0.0520$,$P<0.01$),而其 N 含量与 $\delta^{15}N$ 值呈显著正相关关系($R^2=0.0450$,$P<0.05$)。

从图 3 可知,不同生境的胡杨幼树林叶片 C 含量与其 $\delta^{13}C$ 呈正相关关系($R^2=0.0770$,$P>0.05$),而与其 $\delta^{15}N$ 值均呈负相关关系($R^2=0.0640$,$P>0.05$),但均未达到显著水平;幼树林叶片 N 含量与其 $\delta^{13}C$ 值呈极显著负相关关系($R^2=0.1620$,$P<0.01$),而与其 $\delta^{15}N$ 值均呈显著正相关关系($R^2=0.2450$,$P<0.05$)。

2.4 胡杨幼树和成熟林叶片 SLA 及其与 $\delta^{13}C$、$\delta^{15}N$的相关性

表 2 显示,不同生境幼树林叶片 SLA 的变化范围为 80.166～113.459 cm^2/g,平均值为 91.565 cm^2/g,变异系数为 25.04%;成熟林叶片 SLA 的变化范围为 75.684～133.363 cm^2/g,平均值为 103.141 cm^2/g,变异系数为 19.48%。胡杨幼树和成熟林叶片 SLA 与其 $\delta^{13}C$、$\delta^{15}N$ 的相关性分析表明,叶片 SLA 与其 $\delta^{13}C$ 相关系数为 0.0570 和 0.2330,与其 $\delta^{15}N$ 相关系数为 0.0010 和 0.0450(图 4)。

2.5 胡杨幼树和成熟林叶片水分利用效率及其与 $\delta^{13}C$ 的关系

从表 2 中可以看出,不同生境的胡杨幼树林叶片水分利用效率的范围为 68.070～91.069 μmol/mol,平均值为 77.618 μmol/mol,表现为 G>E>D>H>C>A>B,在于田县(阿日系马扎)(G)的幼树林水分利用效率(91.069 μmol/mol)较高于其他生境的幼树林;胡杨成熟林叶片水分利用效率变化范围为 62.809～97.111 μmol/mol,平均值为 72.463 μmol/mol,表现为 G>E>D>B>C>A>F,在于田县(阿日系马扎)(G)成熟林叶片水分利用效率(97.111 μmol/mol)较高于其他生境的成熟林。

幼树林叶片水分利用效率与 $\delta^{13}C$ 值呈正相关关系($R^2=0.9998$,$P<0.001$),而成熟林叶片水分利用效率与 $\delta^{13}C$ 值呈正相关关系($R^2=1.0000$,$P<0.001$)(图 5)。不同生境幼树和成熟林的水分利用效率随着 $\delta^{13}C$ 数值增大而增大的极显著正相关关系($P<0.001$)。

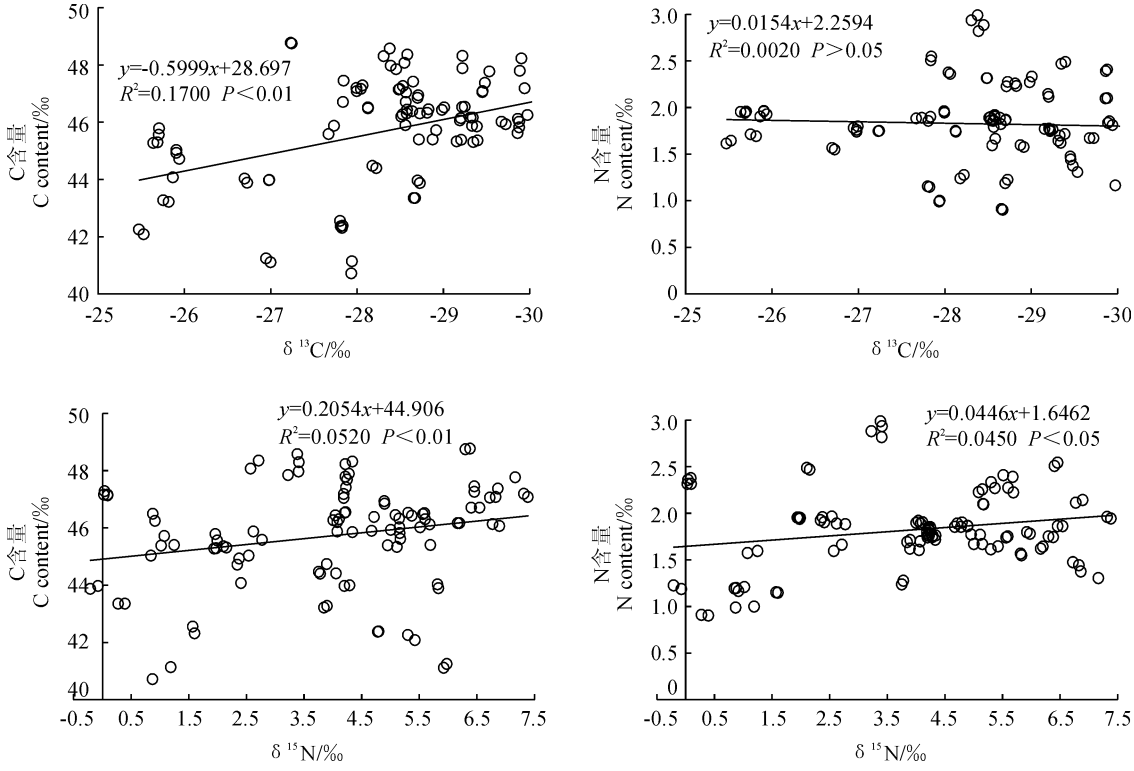

图 2 不同生境成熟林叶片 C、N 含量与 $\delta^{13}C$、$\delta^{15}N$ 值的关系

Fig. 2 Relationships between foliar $\delta^{13}C$, $\delta^{15}N$ values and foliar C, N contents in mature trees of *P. euphratica* from different habitats

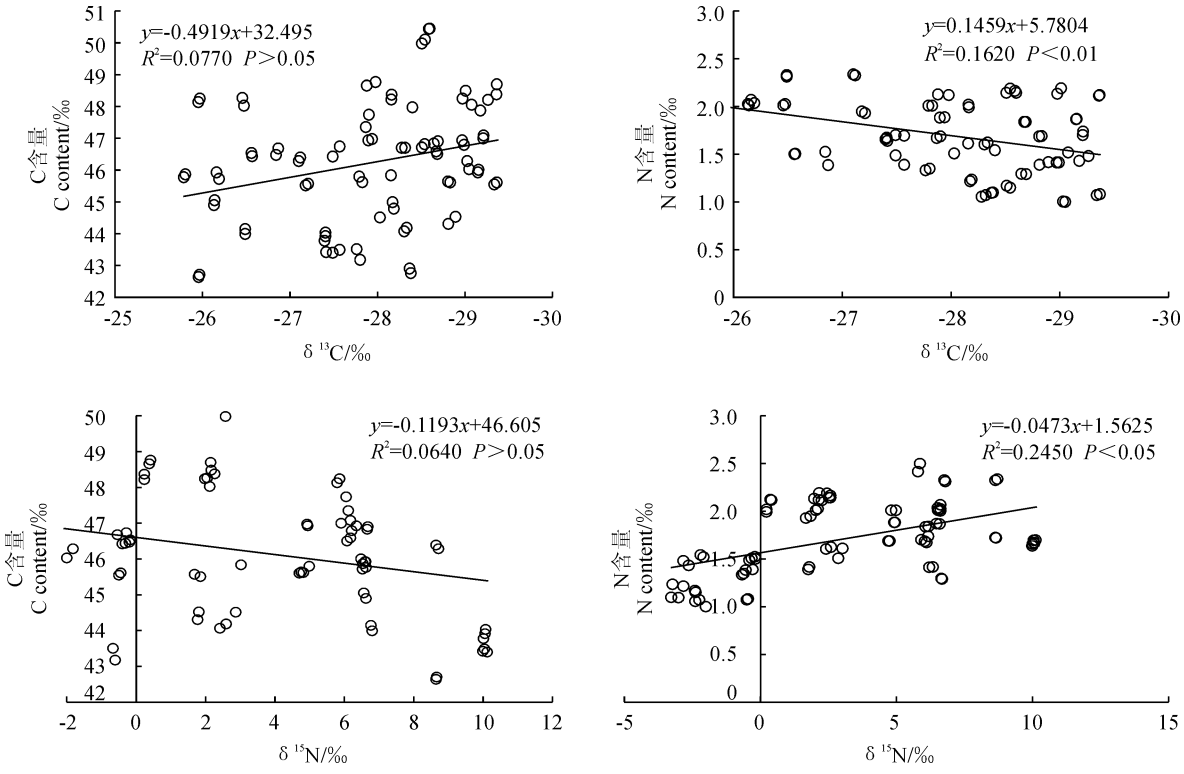

图 3　不同生境幼树林叶片 C、N 含量与 δ13C、δ15N 值的关系

Fig. 3　Relationships between foliar δ13C, δ15N values and foliar C, N contents in young trees of *P. euphratica* from different habitats

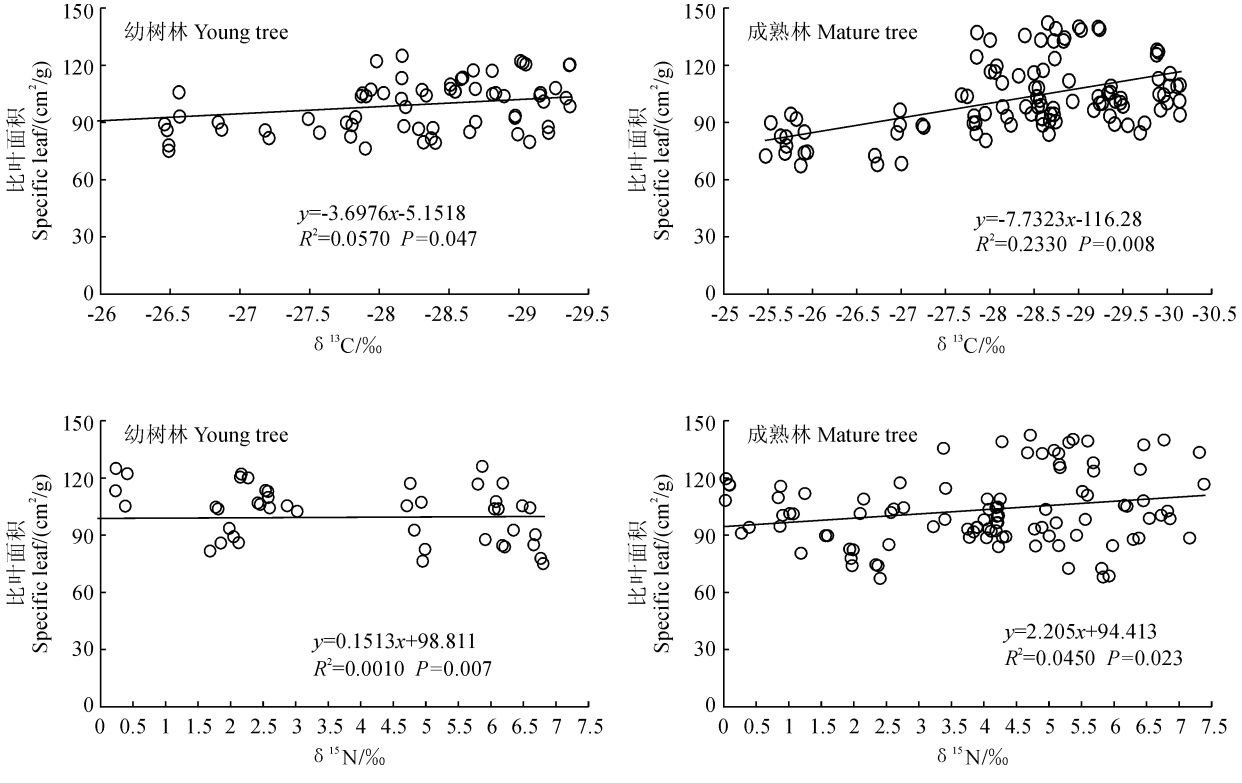

图 4　不同生境幼树和成熟林叶片 δ13C、δ15N 值与比叶面积的相关关系

Fig. 4　Correlation between leaf δ13C, δ15N values and specific leaf area of *P. euphratica* from different habitats

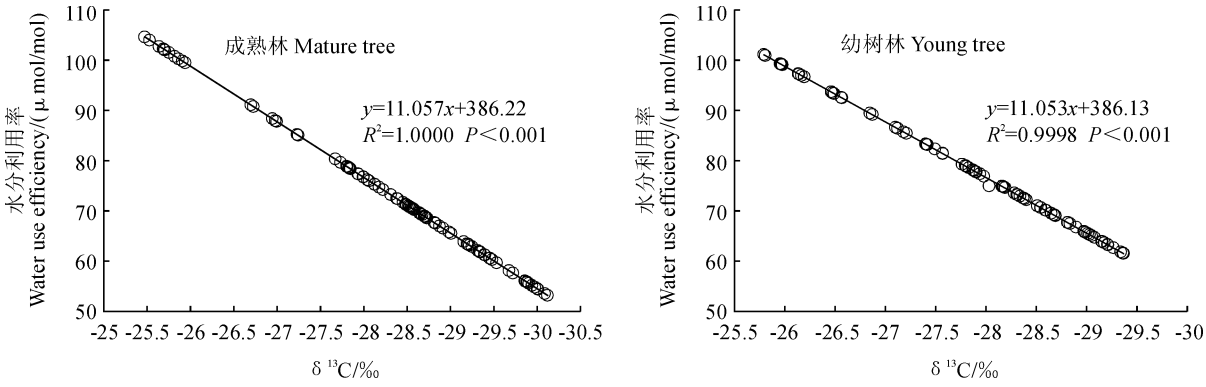

图 5 不同生境胡杨叶片稳定碳同位素与水分利用率的关系

Fig. 5 Relationships of $\delta^{13}C$ and leaf water use efficiency of *P. euphratica* tree from different habitats

3 讨 论

3.1 不同生境胡杨叶片稳定性碳、氮同位素组成

本研究发现不同生境林龄群体的胡杨叶片间的碳同位素组成($\delta^{13}C$)具有显著性差异,而氮同位素组成($\delta^{15}N$)无显著差异。幼树和成熟胡杨叶片的碳稳定同位素组成变化范围分别为 −28.776‰～−26.695‰和−29.717‰～−26.033‰,这符合 C_3 植物的要求。幼树和成熟胡杨叶片的氮稳定同位素组成变化范围分别为 −1.842‰～9.082‰ 和 0.798‰～5.779‰。

同一树种在不同生境中 $\delta^{13}C$、$\delta^{15}N$ 值的变化幅度不同,在本研究中,于田县阿日系马扎的成熟林叶片具有最高的 $\delta^{13}C$ 值(−26.033‰),墨玉县吉格代库都克管理中心的成熟林叶片 $\delta^{13}C$ 值为最低(−29.717‰)。于田县(阿日系马扎)的幼树林具有最高的 $\delta^{15}N$ 值(9.082‰),墨玉县(萨哈里)的幼树林叶片 $\delta^{15}N$ 值为最低(−1.842‰)。植物叶片 $\delta^{13}C$ 值的这种差异是由于不同生长环境的温度、光照强度、水分等因素的不同而影响叶片气孔的开闭和叶片光合羧化酶的活性,进而会在一定的程度上影响植物叶片的碳同位素组成[27]。植物氮同位素 $\delta^{15}N$ 组成不仅受到局部微生境的影响,而且还受到植物生理、土壤氮素转化等一系列复杂过程的影响[28]。

本研究发现幼树林叶片 $\delta^{13}C$ 的平均值(−27.863‰)大于成熟林叶片的对应值(−28.230‰)。这个结果可能与不同林龄胡杨林的根系的发达程度有关,成熟林胡杨的根系能扎入更深的土壤层,相比之下幼树林的根系可能处于较浅的土壤层,容易受到干旱的影响。据报道植物长期处于缺水状态下时能最大限度地通过关闭气孔、降低气孔导度来减少蒸腾水分散失,但同时也使得进入叶内的 CO_2 减少,进行光合作用时对 CO_2 的识别能力降低,使植物叶片 $\delta^{13}C$ 值相对较高[29]。也可能与树龄和光合作用速率有关,成熟林的光合作用速率可能高于幼树林,由于光合作用速率增大将会加大对 CO_2 的需求,从而使叶片对 $\delta^{13}C$ 的利用降低,进而使得叶片中的 $\delta^{13}C$ 值相应降低[12],植物叶片 $\delta^{13}C$ 值与树龄和光合作用速率的关系还需要进一步的研究验证。

3.2 环境因子对胡杨叶片稳定碳、氮同位素组成的影响

环境是植物生存和发展的外部条件,植物个体在每个成长、发育过程中都与外界进行能量和物质交换[30]。研究单一的物种可消除遗传因素对稳定碳、氮同位素组成的影响并且能突出环境因素的作用[25]。植物叶片碳、氮稳定同位素组成($\delta^{13}C$、$\delta^{15}N$)对环境变化非常敏感[31],由于地域差异(海拔经纬度的不同)将会引起许多环境因子的变化(如大气中的 ^{13}C 含量、温度、光照、气压以及水分等)都有可能在一定程度上直接或间接影响植物叶片的 $\delta^{13}C$、$\delta^{15}N$值。

本研究中,幼树林胡杨叶片的 $\delta^{13}C$ 值与海拔间呈极显著正相关关系($P<0.01$),这与西藏沙棘[30]、祁连圆柏(*Sabina przewalskii*)、青海云杉(*Picea crassifolia* Kom.)叶片 $\delta^{13}C$ 值的研究结果相似,这个结果可能与不同海拔条件下的光照条件有关;光照条件好的地方,光合作用时间相对较长,光合同化的 CO_2 增多,致使胞间 CO_2 浓度相对降低,$\delta^{13}C$ 值也就较高[29]。但也有研究认为随着海拔升高气温会下降,低温导致 CO_2 扩散能力降低,从而导致叶片气孔导度降低,进而使叶片 ^{13}C 分馏能力降低,$\delta^{13}C$ 值增大[11-32]。何春霞等[29]、李善家等[33]研究结果表明叶片 $\delta^{13}C$ 值与纬度之间呈极显著正相关,与经

度之间没有显著的相关关系，本研究也得到了相同的结果，幼树和成熟林胡杨叶片 $\delta^{13}C$ 值与纬度之间呈极显著正相关关系（$P<0.01$），成熟林叶片 $\delta^{13}C$ 值与经度间无显著相关关系（$P>0.05$）。

同时，本研究中成熟林胡杨叶片 $\delta^{15}N$ 与海拔间无显著相关关系（$P>0.05$），这与杉木（*Cunninghamia lanceolata*）叶片 $\delta^{15}N$ 的研究结果一致[34]，但幼树林胡杨叶片 $\delta^{15}N$ 值与海拔间呈极显著正相关关系（$P<0.01$）；幼树林叶 $\delta^{15}N$ 值与经度呈显著正相关关系（$P<0.05$），而成熟林叶片无显著相关关系（$P>0.05$）。因为海拔、经纬度的变化伴随降水、土壤 $\delta^{15}N$、土壤养分等方面的变化，而这些变化都是影响植物氮同位素分馏的重要因子，所以对植物叶片 $\delta^{15}N$ 值产生明显影响[35]。

3.3　幼树和成熟林胡杨叶片碳、氮元素含量与其 $\delta^{13}C$、$\delta^{15}N$ 的关系

碳、氮是植物必需的养分元素，在植物各项生命活动中发挥着重要作用[30]，研究表明，植物叶片 N 含量可以调节叶片厚度引起 CO_2 扩散通道长度的改变，并且通过影响叶片气孔密度的提高或者降低其给叶绿体输送 CO_2 的能力[1]，也可以通过影响叶片吸收和固定大气中的 CO_2，进而影响胞间 CO_2 分压和大气 CO_2 分压的比值，这些都会对植物叶片 $\delta^{13}C$ 值产生影响[36]。本研究发现幼树和成熟林胡杨叶片 N 含量的变化范围分别为 1.327‰～2.116‰和 1.164‰～2.450‰，幼树林叶片 N 含量的平均值（1.708‰）稍低于成熟林叶片（1.823‰），并且已有研究表明植物叶片中的 N 含量与 $\delta^{13}C$ 值呈极显著正相关[37-38]，本研究的结果与之一致。其中，成熟林胡杨叶片 N 含量与 $\delta^{13}C$ 值虽呈正相关，而未达到显著水平（$P>0.05$），这与马剑英等[39]的研究结果一致；成熟林胡杨叶片 N 含量与 $\delta^{15}N$ 值呈显著正相关关系（$P<0.05$），已有研究也证明叶片 N 含量与 $\delta^{15}N$ 呈正相关关系[7]。幼树林胡杨叶片 N 含量与其 $\delta^{13}C$ 值呈极显著负相关关系（$P<0.01$），而与其 $\delta^{15}N$ 值均呈显著正相关关系（$P<0.05$）。同时，本研究发现幼树林胡杨叶片 C 含量的平均值为 46.225‰，其对应的 $\delta^{13}C$ 平均值为－27.863‰，这都稍高于成熟林叶片 C 含量的（45.720‰）和 $\delta^{13}C$ 值（－28.230‰）的平均值，这可能与植物在不同的生活史阶段采用不一样的资源利用策略有关。幼树和成熟胡杨叶片 C 含量与 $\delta^{13}C$ 分别呈现正相关和显著负相关关系但都未达到显著水平，但对油松（*Pinus tabuliformis*）的相关研究表明叶片 $\delta^{13}C$ 值与叶片 C 含量之间没有显著的相关关系[33]，而幼树和成熟林叶片 C 含量与 $\delta^{15}N$ 值分别呈负相关（$P>0.05$）和极显著正相关（$P<0.01$）。

3.4　幼树和成熟林叶片 SLA 与 $\delta^{13}C$、$\delta^{15}N$ 的相关性

植物叶片是植物体暴露于大气环境中面积最大的器官，也是进行蒸腾作用和同化作用的主要器官[40]。比叶面积（SLA）是衡量植物生长及其对环境变化响应的一个重要指标[15]，更高的比叶面积意味着叶片组织密度较高，碳同化积累的有机物较多[41]。本研究发现不同生境幼树林和成熟林叶片 SLA 的变化范围分别为 80.166～113.459 和 75.684～133.363 cm^2/g，叶片 SLA 与 $\delta^{13}C$、$\delta^{15}N$ 间的相关系数分别为 0.0570 和 0.2330，0.0010 和 0.0450。冯秋红[42]对 5 种不同生活型高山植物的研究发现随着比叶面积的增加植物叶片的 $\delta^{13}C$ 值显著降低。本研究发现成熟林叶片 SLA 的平均值（103.141cm^2/g）高于幼树林叶片（91.565 cm^2/g），而且幼树林叶片 $\delta^{13}C$ 的平均值大于成熟林叶片的对应值。关于比叶面积（SLA）与 $\delta^{13}C$ 值变化的生理机制的研究认为叶片增厚，SLA 会降低，CO_2 从气孔到叶绿体的扩散路径增长，单位叶面积细胞间气相叶肉细胞表面积增加，而叶肉细胞孔隙度降低导致更大的叶肉细胞阻力（叶肉细胞导度降低）[43-44]，进而胞间 CO_2 分压与大气 CO_2 分压比值（Pc/Pa）降低，叶片 $\delta^{13}C$ 增加，并且表明随着海拔升高而增厚的叶片（SLA 较低）具有更多的光合酶，因此对 CO_2 的需求更多，进而导致 Pc/Pa 降低，叶片 $\delta^{13}C$ 值增加[43]。

3.5　幼树和成熟林胡杨叶片水分利用效率与 $\delta^{13}C$ 的关系

水分利用效率是植物响应干旱环境的一个基本而重要的特性，使植物通过维持较长的土壤水分可利用性而具有避免干旱的性能[2]。本研究发现不同生境幼树林叶片水分利用效率平均值（77.618 μmol/mol）稍高于成熟林叶片的平均值（72.463 μmol/mol）。已有研究报道植物叶片的 $\delta^{13}C$ 值与其水分利用效率呈一定程度的正相关，植物 $\delta^{13}C$ 值越大，植物水分利用效率越高[45-46]，本研究的结果与之相似，不同林龄的胡杨水分利用率呈现随着叶片 $\delta^{13}C$ 值的增大而增大趋势，如于田县（阿日系马扎）的幼树和成熟林叶片具有较高的 $\delta^{13}C$ 值（－26.695‰和－26.033‰），其对应的水分利用效率（91.069 和 97.111 μmol/mol）也高于其他生境的

幼树和成熟林。研究表明生长在干旱生境中的植物具有较高的 $\delta^{13}C$ 值，水分短缺时植物为了减少水分的蒸发，往往会关闭一部分气孔，使通过气孔进入叶片的 CO_2 减少，引起植物叶片内部 CO_2 浓度下降[3]，植物对 CO_2 的识别能力必然降低，从而使叶片 $\delta^{13}C$ 值升高[39]。

4 结 论

干旱区不同生境胡杨叶片稳定性碳同位素组成具有显著性差异，而稳定性氮同位素组成则无显著差异。幼树林叶片碳稳定同位素组成($\delta^{13}C$)高于成熟林叶片，而幼树林叶片氮稳定同位素组成($\delta^{15}N$)稍低于成熟林叶片。幼树和成熟林叶片比叶面积与其 $\delta^{13}C$ 的相关系数分别为 0.0570 和 0.2330，与其 $\delta^{15}N$ 的相关系数分别为 0.0010 和 0.0450。幼树和成熟胡杨叶片 C 含量与 $\delta^{13}C$ 分别呈现正相关和显著负相关关系但都未达到显著水平，成熟林叶片 N 含量与 $\delta^{13}C$ 值呈正相关而幼树林的呈极显著负相关关系；成熟林叶片 C 含量与 $\delta^{15}N$ 值呈正相关，而幼树林则呈负相关关系。幼树和成熟树林叶片的 $\delta^{13}C$ 值随着纬度的升高呈现升高趋势，幼树林叶片 $\delta^{15}N$ 值随着海拔、经纬度的升高呈现升高趋势，成熟林叶片 $\delta^{15}N$ 值与经度没有明显相关性，成熟林叶片 $\delta^{15}N$ 与海拔、经度无显著相关性。幼树和成熟林叶片水分利用效率与 $\delta^{13}C$ 值呈正相关关系，于田县(阿日系马扎)的幼树和成熟林叶片 $\delta^{13}C$ 值和水分利用效率高于其他生境的叶片 $\delta^{13}C$ 值和水分利用效率。本研究探讨了不同生境胡杨叶片的碳、氮同位素与环境因子及水分利用效率之间相互关系，为合理保护胡杨种质资源和干旱区自然生态系统提供理论依据。

参考文献：

[1] 林 晗，陈 辉，吴承祯，等. 福建千年桐种源叶片 $\delta^{13}C$ 与环境及叶碳氮含量的关系[J]. 自然资源学报，2013，**28**(8)：1 328-1 336.
LIN H，CHEN H，WU C Z，*et al*. Relationship between foliar $\delta^{13}C$ and environmental factors and foliar C and N contents of *Aleurites montana* in Fujian Province [J]. *Journal of Natural Resources*，2013，**28**(8)：1 328-1 336.

[2] 曹生奎，冯 起，司建华，等. 不同立地条件下胡杨叶片稳定碳同位素组成及水分利用效率的变化[J]. 冰川冻土，2012，**34**(1)：155-160.
CAO S K，FENG Q，SI J H，*et al*. Variations of foliar stable carbon isotope composition and water use efficiency in *Populus euphratica* for different plots[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*，2012，**34**(1)：155-160.

[3] 邱 权，李吉跃，王军辉，等. 柴达木盆地白刺叶片 $\delta^{13}C$ 与叶片和土壤养分指标的关系[J]. 西北植物学报，2013，**33**(11)：2 301-2 308.
QIU Q，LI J Y，WANG J H，*et al*. Relationship on leaf $\delta^{13}C$ and nutrients in leaf and soil of different *Nitraria tangutorum* populations in Tsaidam Basin[J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*，2013，**33**(11)：2 301-2 308.

[4] 刘贤赵，张 勇，宿 庆，等. 陆生植物氮同位素组成与气候环境变化研究进展[J]. 地球科学进展，2014，**29**(2)：216-226.
LIU X Z，ZHANG Y，SU Q，*et al*. Progress of research on relationships between terrestrial plant nitrogen isotope composition and climate environment change [J]. *Advances in Earth Science*，2014，**29**(2)：216-226.

[5] 赵艳艳，徐隆华，姚步青，等. 模拟增温对高寒草甸植物叶片碳氮及其同位素 $\delta^{13}C$ 和 $\delta^{15}N$ 含量的影响[J]. 西北植物学报，2016，**36**(4)：777-783.
ZHAO Y Y，XU L H，YAO B Q，*et al*. Influence of simulated warming to the carbon，nitrogen and their stability isotope ($\delta^{13}C$，$\delta^{15}N$) contents in alpine meadow plant leaves [J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*，2016，**36**(4)：777-783.

[6] SWAP R J，ARANIBAR J N，DOWTY P R，*et al*. Natural abundance of $\delta^{13}C$ and $\delta^{15}N$ in C_3 and C_4 vegetation of southern Africa：patterns and implications[J]. *Global Change Biology*，2004，**10**(3)：350-358.

[7] 周咏春，程希雷，樊江文. 植物氮同位素组成与其影响因子的关系研究进展[J]. 草地学报，2012，**20**(6)：981-989.
ZHOU Y C，CHENG X L，FAN J W. Research progress of relationships between plant $\delta^{15}N$ and influence factors (Review)[J]. *Acta Agrestia Sinica*，2012，**20**(6)：981-989.

[8] 赵 丹，程军回，刘耘华，等. 荒漠植物梭梭稳定碳同位素组成与环境因子的关系[J]. 生态学报，2017，**37**(8)：2 743-2 752.
ZHAO D，CHENG J H，LIU Y H，*et al*. Relationship of stable carbon isotope composition with environmental factors in the desert plant，*Haloxylon ammodendron* [J]. *Acta Ecologica Sinica*，2017，**37**(8)：2 743-2 752.

[9] 冯秋红，程瑞梅，史作民，等. 巴郎山刺叶高山栎叶片 $\delta^{13}C$ 对海拔高度的响应[J]. 生态学报，2011，**31**(13)：3 629-3 637.
FENG Q H，CHENG R M，SHI Z M，*et al*. Response of foliar $\delta^{13}C$ of *Quercus spinosa* to altitudinal gradients[J]. *Acta Ecologica Sinica*，2011，**31**(13)：3 629-3 637.

[10] 董 雪，李永华，辛智鸣，等. 唐古特白刺叶性状及叶片 $\delta^{13}C$、$\delta^{15}N$ 沿降水梯度的变化特征[J]. 生态学报，2019，**39**(10)：3 700-3 709.

DONG X, LI Y H, XIN Z M, *et al*. Variation in leaf traits and leaf $\delta^{13}C$ and $\delta^{15}N$ content in *Nitraria tangutorum* along precipitation gradient [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, **39**(10): 3 700-3 709.

[11] 张　鹏，王　刚，张　涛，等. 祁连山两种优势乔木叶片$\delta^{13}C$的海拔响应及其机理[J]. 植物生态学报，2010，**34**(2)：125-133.

ZHANG P, WANG G, ZHANG T, *et al*. Responses of foliar $\delta^{13}C$ in *Sabina przewalskii* and *Picea crassifolia* to altitude and its mechanism in the Qilian Mountains, China [J]. *Acta Phytoecologica Sinica*, 2010, **34**(2): 125-133.

[12] 郑璐嘉，黄志群，何宗明，等. 林龄、叶龄对亚热带杉木人工林碳氮稳定同位素组成的影响[J]. 林业科学，2015，**51**(1)：22-28.

ZHENG L J, HUANG Z Q, HE Z M, *et al*. Influence of forest and foliar ages on the composition of stable carbon and nitrogen isotope of *Cunninghamia lanceolata* in subtropic China [J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2015, **51**(1): 22-28.

[13] 彭邵锋，陆　佳，陈永忠. 山茶属植物叶片 $\delta^{13}C$ 和 $\delta^{15}N$ 与养分含量及光合作用的关系[J]. 中南林业科技大学学报，2016，**36**(1)：1-5.

PENG S F, LU J, CHEN Y Z. Leaf $\delta^{13}C$ and $\delta^{15}N$ in relationship with nutrients and photosynthesis of different *Camellia* species [J]. *Journal of Central South University of Forestry & Technology*, 2016, **36**(1): 1-5.

[14] 徐婷婷，毕江涛，马　飞. 毛乌素沙地 2 种锦鸡儿属植物的光合生理特性[J]. 森林与环境学报，2016，**36**(1)：48-53.

XU T T, BI J T, MA F. Photosynthetic characteristics of *Caragana* species in Mu Us sandy land [J]. *Journal of Forest and Environment*, 2016, **36**(1): 48-53.

[15] 赵小祥，王根绪，彭阿辉，等. 贡嘎山林线峨嵋冷杉叶片功能属性特征[J]. 山地学报，2017，**35**(5)：653-662.

ZHAO X X, WANG G X, PENG A H, *et al*. Leaf functional traits of *Abies fabri*(Mast.) in the treeline of Gongga Mountain[J]. *Journal of Mountain Research*, 2017, **35**(5): 653-662.

[16] DAWSON T E, MAMBELLI S, PLAMBOECK A H, *et al*. Stable isotopes in plant ecology[J]. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 2002, **33**(1): 507-559.

[17] 刘倩雯. 额济纳绿洲胡杨种子萌发及幼苗生长影响因子[D]. 北京：北京林业大学，2011.

[18] ZHANG J, FENG J J, LU J, *et al*. Transcriptome differences between two sister desert poplar species under salt stress[J]. *BMC Genomics*, 2014, **15**(1): 337.

[19] 卡依拉·阿布都艾尼，伊丽米努尔，依巴代提·木合旦尔. ^{60}Co-γ 射线辐射对 NaCl 胁迫下胡杨种子萌发的影响[J]. 核农学报，2019，**33**(3)：440-445.

ABUDUAINI K, YILIMINUER, MUHEDANER Y. Effects of ^{60}Co-γ radiation on seeds germination of *Populuse uphratica* source under NaCl stress[J]. *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*, 2019, **33**(3): 440-445.

[20] LING H, ZHANG P, XU H, *et al*. How to regenerate and protect desert riparian *Populus euphratica* forest in arid areas [J]. *Scientific Reports*, 2015, **5**(154): 81-89.

[21] CHEN J F, ZHANG J, HU J J, *et al*. Integrated regulatory network reveals the early salt tolerance mechanism of *Populus euphratica*[J]. *Scientific Reports*, 2017, **7**(1): 1-13.

[22] 韩　路，王家强，王海珍，等. 塔里木河上游胡杨种群结构与动态[J]. 生态学报，2014，**34**(16)：4 640-4 651.

HAN L, WANG J Q, WANG H Z, *et al*. The population structure and dynamics of *Populus euphratica* at the upper reaches of the Tarim River [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2014, **34**(16): 4 640-4 651.

[23] 伊丽米努尔，木巴热克·阿尤普，雪合拉提·伊明诺夫，等. 不同种源胡杨(*Populus euphratica*)种子萌发对盐胁迫的响应以及与生态因子的关系[J]. 西北林学院学报，2017，**32**(4)：13-21.

YILIMINUER, MUBAREK A, XUEHELATI Y M N F, *et al*. Seed germination of *Populus euphratica* Olive. from different provenances under NaCl stress and its correlations with ecological factors [J]. *Journal of Northwest Forestry University*, 2017, **32**(4): 13-21.

[24] 伊丽米努尔，艾力江·麦麦提，卓热木·塔西，等. NaCl 胁迫下不同种源胡杨种子萌发特性[J]. 西北林学院学报，2015，**30**(6)：88-94.

YILIMINUER, AILIJIANG · MAIMAITI, ZHUOREMU · TAXI, *et al*. Seed germination characteristics of *Populus euphratica* from different provenances under NaC1 stress[J]. *Journal of Northwest Forestry University*, 2015, **30**(6): 88-94.

[25] 袁亚鹏，赵　阳，赵传燕，等. 黑河下游不同生境胡杨(*Populus euphratica*)叶片碳同位素组成特征[J]. 中国沙漠，2015，**35**(6)：1 505-1 511.

YUAN Y P, ZHAO Y, ZHAO C Y, *et al*. Characteristics of foliar stable carbon isotope composition of *Populus euphratica* for different niche in the lower reach of the Heihe river [J]. *Journal of Desert Research*, 2015, **35**(6): 1 505-1 511.

[26] 马剑英，孙惠玲，夏敦胜，等. 塔里木盆地胡杨两种形态叶片碳同位素特征研究[J]. 兰州大学学报(自然科学版)，2007，**43**(4)：51-55.

MA J Y, SUN H L, XIA D S, *et al*. Stable carbon isotope compositional characteristics of different leaf shapes of *Populus euphratica* Oliv. in the Tarim Basin[J]. *Journal of Lanzhou University*(Natural Sciences), 2007, **43**(4): 51-55.

[27] 文陇英，陈　拓，张满效，等. 不同生境下祁连圆柏叶片色素和稳定碳同位素组成的变化[J]. 冰川冻土，2010，**32**(4)：823-828.

WEN L Y, CHEN T, ZHANG M X, *et al*. Variations of pigments and stable-carbon isotope ratios in *Sabina przewalskii* under different environments[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2010, **32**(4): 823-828.

[28] 蒋碧玉. 西藏沙棘叶片属性的空间变化及对环境的响应研究[D]. 兰州：西北师范大学，2014.

[29] 何春霞，李吉跃，孟　平，等. 树木叶片稳定碳同位素分馏

对环境梯度的响应[J]. 生态学报，2010，**30**(14)：3 828-3 838.

HE C X，LI J Y，MENG P，*et al*. Changes in leaf stable carbon isotope fractionation of trees across climatic gradients [J]. *Acta Ecologica Sinica*，2010，**30**(14)：3 828-3 838.

[30] 陈立同. 中国西部森林树种对环境变化梯度的生理生态响应[D]. 兰州：兰州大学，2010.

[31] 张 鹏. 青海云杉个体水分利用效率、种群动态及土壤碳氮研究[D]. 兰州：甘肃农业大学，2009.

[32] GALE J. Availability of carbon dioxide for photosynthesis at high altitudes：Theoretical considerations [J]. *Ecology*，1972，**53**(3)：494-497.

[33] 李善家，张有福，陈拓. 西北油松叶片 $\delta^{13}C$ 特征与环境因子和叶片矿质元素的关系[J]. 植物生态学报，2011，**35**(6)：596-604.

LI S J，ZHANG Y F，CHEN T. Relationships between foliar stable carbon isotope composition and environmental factors and leaf element contents of *Pinus tabulaeformis* in northwestern China[J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*，2011，**35**(6)：596-604.

[34] 王 亮，曹小青，孙孟瑶，等. 不同叶龄杉木人工林叶碳氮化学计量及其稳定同位的海拔梯度变化特点[J]. 生态环境学报，2019，**28**(9)：1 776-1 784.

WANG L，CAO X Q，SUN M Y，*et al*. Foliar carbon and nitrogen stoichiometric trait and isotope discrimination of different *Cunninghamialanceolata* foliar ages across an altitude gradient[J]. *Ecology and Environmental Sciences*，2019，**28**(9)：1 776-1 784.

[35] 刘贤赵，王国安，李嘉竹，等. 北京东灵山地区现代植物氮同位素组成及其对海拔梯度的响应[J]. 中国科学(D辑：地球科学)，2009，**39**(10)：1 347-1 359.

LIU X Z，WANG G A，LI J Z，*et al*. Nitrogen isotope composition of modern plants in Dongling Mountain area of Beijing and its response to altitude gradient [J]. *Scientia Sinica* (Terrae)，[J]. *Science in China* [Series D(Earth Sciences)]，2009，**39**(10)：1 347-1 359.

[36] 王英姿. 灵石山不同海拔米槠林优势种叶片 $\delta^{13}C$ 及养分等属性特征的研究[D]. 福州：福建农林大学，2009.

[37] 张有福，陈 拓，张 鹏，等. 青藏高原不同生境中祁连圆柏叶片 $\delta^{13}C$ 变化及其与环境和树高的关系[J]. 冰川冻土，2015，**37**(5)：1 388-1 395.

ZHANG Y F，CHEN T，ZHANG P，*et al*. Foliar $\delta^{13}C$ values of *Sabina przewalskii*in different habitats on the Tibetan Plateau：variation and relation with environmental factors and tree height [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*，2015，**37**(5)：1 388-1 395.

[38] 赵良菊，肖洪浪，刘晓宏，等. 沙坡头油蒿和柠条叶片 $\delta^{13}C$ 和N含量的季节变化特征[J]. 地球学报，2005，**26**(s1)：213-219.

ZHAO L J，XIAO H L，LIU X H，*et al*. Seasonal variation characteristics of leaf carbon isotope discrimination $\delta^{13}C$ and N concentration of *C. korshinskii* and *A. ordosica* [J]. *Acta Geoscientica Sinica*，2005，**26**(s1)：213-219.

[39] 马剑英，陈发虎，夏敦胜，等. 荒漠植物红砂叶片 $\delta^{13}C$ 值与生理指标的关系[J]. 应用生态学报，2008，**19**(5)：1 166-1 171.

MA J Y，CHEN F H，XIA D S，*et al*. Correlations between leaf $\delta^{13}C$ and physiological parameters of desert plant *Reaumuriasoongorica*[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*，2008，**19**(5)：1 166-1 171.

[40] 王日照，陈亚鹏，陈亚宁，等. 地下水埋深对胡杨(*Populus euphratica*)叶片形态结构和水力导度的影响[J]. 中国沙漠，2016，**36**(5)：1 302-1 309.

WANG R Z，CHEN Y P，CHEN Y N，*et al*. Effects of groundwater level on morphological，anatomical structure and leaf hydraulic conductance of *Populuseuphratica*[J]. *Journal of Desert Research*，2016，**36**(5)：1 302-1 309.

[41] DAWSON T E，MAMBELLI S，PLAMBOECK A H，*et al*. Stable isotopes in plant ecology[J]. *Annual Review of Ecology and Systematics*，2002，**33**(1)：507-559.

[42] 冯秋红. 川西亚高山不同生活型植物叶片 $\delta^{13}C$ 的海拔响应研究[D]. 北京：中国林业科学研究院，2011.

[43] HANBA Y T，MIYAZAWA S I，TERASHIMA I. The influence of leaf thickness on the CO_2 transfer conductance and leaf stable carbon isotope ratio for some evergreen tree species in Japanese warm-temperate forests[J]. *Functional Ecology*，1999，**13**(5)：632-639.

[44] KOGAMI H，HANBA Y T，KIBE T，*et al*. CO_2 transfer conductance，leaf structure and carbon isotope composition of *Polygonumcuspidatum* leaves from low and high altitudes [J]. *Plant*，*Cell and Environment*，2001，**24**(5)：529-538.

[45] 樊金娟，宁 静，孟宪菁，等. C_3 植物叶片稳定碳同位素对温度、湿度的响应及其在水分利用中的研究进展[J]. 土壤通报，2012，**43**(6)：1 502-1 507.

FAN J J，NING J，MENG X J，*et al*. Stable carbon isotopic compositions of C_3 plant responses to the temperature and moisture and their application in water use efficiency[J]. *Chinese Journal of Soil Science*，2012，**43**(6)：1 502-1 507.

[46] 金鑫鑫，汪景宽，孙良杰，等. 稳定 ^{13}C 同位素示踪技术在农田土壤碳循环和团聚体固碳研究中的应用进展[J]. 土壤，2017，**49**(2)：217-224.

JIN X X，WANG J K，SUN L J，*et al*. Progress of carbon cycle in farmland and sequestration in soil aggregates revealed by stable ^{13}C isotope[J]. *Soils*，2017，**49**(2)：217-224.

(编辑：裴阿卫)