

内蒙古草地植被 $\delta^{13}\text{C}$ 空间格局及其对气候因子的响应

周咏春¹, 程希雷², 樊江文³, 徐新阳¹

(1. 东北大学 资源与土木工程学院, 辽宁 沈阳 110819; 2. 辽宁省环境科学研究院, 辽宁 沈阳 110031;
3. 中国科学院地理科学与资源研究所 陆地表层格局与模拟重点实验室, 北京 100101)

摘 要: 为了探明内蒙古草地植物叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 的空间格局及其对气候因子的响应, 于植物生长最旺盛的 8 月, 在内蒙古共采集来自 47 个样地的 126 个 C_3 植物样品, 利用 GPS 记录每个样地的地理参数, 并从全国陆地生态信息气象栅格数据库中提取每个样地的气象信息, 在实验室利用同位素质谱仪测定叶片 $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ 。研究发现, C_3 植物叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 随海拔升高而增大, 随经纬度的增加而减小; 降水和大气压强与叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 显著负相关, 它们共同决定了叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 的空间格局, 其中水分是主导因素; 温度对叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 没有显著影响。

关 键 词: 叶片 $\delta^{13}\text{C}$; 草地; C_3 植物; 空间格局; 气候因子; 内蒙古

中图分类号: X 171.1; Q 948.11 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-3026(2016)02-0273-07

Spatial Pattern of Foliar $\delta^{13}\text{C}$ in C_3 -dominated Grasslands and Its Responses to Climatic Factors in Inner Mongolia of China

ZHOU Yong-chun¹, CHENG Xi-lei², FAN Jiang-wen³, XU Xin-yang¹

(1. School of Resources & Civil Engineering, Northeastern University, Shenyang 110819, China; 2. Liaoning Academy of Environmental Sciences, Shenyang 110031, China; 3. Key Laboratory of Land Surface Pattern and Simulation, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China. Corresponding author: FAN Jiang-wen, E-mail: fanjw@igsnrr.ac.cn)

Abstract: In order to explore the pattern and climatic control of foliar $\delta^{13}\text{C}$, 126 samples of C_3 -plant species were collected from 47 areas in the Inner Mongolia during its August prosperous season. The geographic parameters of each site were recorded by GPS, and climatic information of each site was extracted from Meteorological Database of the Chinese Ecological Research Network. Foliar $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ ratios were determined by an isotope mass spectrometer. The results show that the increasing trend of C_3 -plant foliar $\delta^{13}\text{C}$ excursion changes positively with the increase of altitude, but negatively with the increase of longitude and latitude degrees. Climatic factors controlling the C_3 -plant foliar $\delta^{13}\text{C}$ variations are mainly involved in the amount of seasonal rainfall and atmospheric pressure, as well in negative relationships, which control spatial distribution of the C_3 -plant foliar $\delta^{13}\text{C}$. In addition, variations of foliar $\delta^{13}\text{C}$ show nothing in trend of the temperature changes here.

Key words: foliar $\delta^{13}\text{C}$; grassland; C_3 -plant; spatial pattern; climatic factor; Inner Mongolia

近年来,植物碳同位素组成($\delta^{13}\text{C}$)被广泛用于植物生理生态、全球碳循环以及全球气候变化研究中^[1-2]。植物 $\delta^{13}\text{C}$ 值与细胞内外 CO_2 浓度比

(C_i/C_a)密切相关,而 C_i/C_a 受植物光合效率(A)和植物气孔导度(g)的影响^[3]。环境因子(如温度、降水、大气压等)通过对 A 和 g 产生影响,进

收稿日期: 2014-12-01

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(31400413); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(N130301001); 辽宁省博士启动基金资助项目(20141017); 国家重点基础研究发展计划项目(2010CB950902); 国家科技支撑计划项目(2013BAC03B04)。

作者简介: 周咏春(1982-),女,辽宁盖州人,东北大学讲师,博士; 樊江文(1961-),男,甘肃陇西人,中国科学院地理科学与资源研究所研究员,博士生导师; 徐新阳(1967-),男,浙江金华人,东北大学教授,博士生导师。

而影响植物 $\delta^{13}\text{C}$. 因此,植物 $\delta^{13}\text{C}$ 能够可靠记录植物生长所处的环境信息,提供外界环境和植物生理生态特征的综合信息,同时,也是碳循环过程中生物地球化学过程的综合体现^[2,4].

随着地理梯度(海拔、经度、纬度)的变化,温度、降水、大气压等环境因素会发生变化. 这些因素的变化会通过影响物光合气体交换以及生理生态特性而改变植物 C_i/C_a 值,最终对植物 $\delta^{13}\text{C}$ 产生影响. 因此,植物 $\delta^{13}\text{C}$ 随着地理梯度会具有一定的分布格局. 然而,关于植物 $\delta^{13}\text{C}$ 与地理梯度关系的研究多是关于植物 $\delta^{13}\text{C}$ 与海拔的关系研究^[5-6],而关于经纬度的研究较少^[7-8]. 在不存在干旱胁迫条件下,植物 $\delta^{13}\text{C}$ 随海拔的升高而增大已被认为是普遍规律^[6,8-10]. 然而,有研究发现,在干旱胁迫条件下,水分能够改变植物 $\delta^{13}\text{C}$ 随海拔变化的趋势. 例如, Van de Water 等^[11] 研究发现,由于低海拔地区的水分有效性低于高海拔地区,导致高海拔地区植物 $\delta^{13}\text{C}$ 显著低于低海拔地区植物. 现有研究已表明,水分是内蒙古地区植物生长限制因子^[12],但是在内蒙古水分是否会改变植物 $\delta^{13}\text{C}$ 随海拔升高而增大的趋势还不清楚. 此外,该地区植物 $\delta^{13}\text{C}$ 随经纬度会有怎样的变化趋势以及除了水分外的其余气候因子会对植物 $\delta^{13}\text{C}$ 产生怎样影响也都还不清楚. 因此,在内蒙古开展植物叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 与地理参数和气候因子的关系研究,有助于探明植物 $\delta^{13}\text{C}$ 的空间变化特征及其对气候因子的响应规律,这对于深入理解全球气候

变化对草地生态系统碳循环的影响具有重要意义,并可为科学认识和预测气候变化条件下草地生态系统的演化和发展趋势提供科学依据.

1 材料与方法

1.1 采样区概况

研究区为我国内蒙古自治区,该区域平均海拔约 1 000 m(表 1). 降水是该区域植物生长最主要的驱动因子,大部分地区属于干旱、半干旱的大陆性气候,自东北向西南,年均降雨量由 450 mm 以上逐渐递减至 50 mm 左右,年均温度范围约为 $-3\sim 9\text{ }^{\circ}\text{C}$,温度与降水之间有显著的负相关关系(表 1). 从东北到西南,草地植被类型依次为温性草甸草原、温性草原、温性荒漠草原、温性草原化荒漠、温性荒漠,主要优势种有:羊草(*Leymus chinensis*)、大针茅(*Stipa grandis*)、贝加尔针茅(*Stipa baicalensis*)、克氏针茅(*Stipa krylovii*)、戈壁针茅(*Stipa tianschanica*)、糙隐子草(*Cleistogenes squarrosa*)、无芒隐子草(*Cleistogenes songorica*)、冰草(*Agropyron cristatum*)、沙生冰草(*Agropyron desertorum*)、冷蒿(*Artemisia frigida*)、小叶锦鸡儿(*Caragana microphylla*)、珍珠猪毛菜(*Salsola passerina*)、木本猪毛菜(*Salsola arbuscula*)、多根葱(*Allium victorialis*)等. 土壤类型以草原土为主,此外还有草甸土、风沙土等隐域性土壤^[13].

表 1 内蒙古地区气候、地理因素间的相关系数

Table 1 Correlation between geographic parameters and climatic factors in the Inner Mongolia of China

因素	海拔	经度	纬度	年均降雨量	干燥度	年均温度
经度	-0.83					
纬度	-0.91	0.90				
年均降雨量	-0.51	0.79	0.59			
干燥度	0.51	-0.84	-0.64	-0.93		
年均温度	0.77	-0.95	-0.94	-0.72	0.79	
大气压强	-1.00	0.82	0.90	0.50	-0.49	-0.75

注:显著性水平平均达到 $P<0.001$.

1.2 样品采集与测定

1.2.1 样品采集

在 2003—2007 植物生长最旺盛的 8 月,沿从东北到西南方向在内蒙古地区采集样品,大约每隔 50 km 选取一个样地,共选择具有代表性的草地样地 47 个(图 1),用 GPS 记录每一个样地的经纬度及海拔. 每个样地随机选取三个 $1\text{ m}\times 1\text{ m}$ 样方. 每一个样方的每一种优势种都分别装进一

个信封中.

1.2.2 样品测定

根据叶片大小,从至少 3 个植株个体中为每个样地的每个优势种选取 3~20 片叶片,叶片用蒸馏水洗净、风干后置于 $80\text{ }^{\circ}\text{C}$ 烘箱中烘干,烘干至恒重后称重. 称重后用植物粉碎机将叶片粉碎成粉末,用以测定叶片碳同位素组成.

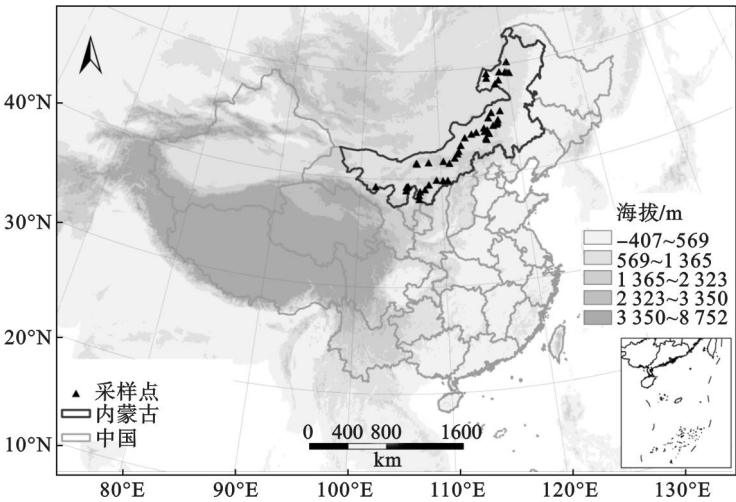


图 1 内蒙古采样点分布图

Fig. 1 Locations of the sample sites for foliar $\delta^{13}\text{C}$ in the Inner Mongolia

在中科院地理所中心理化分析实验室利用同位素质谱仪(Finnigan MAT-253, Thermo Electron)分析碳同位素组成.碳同位素组成的表达式为 $\delta^{13}\text{C}(\text{‰}) = [(R_{\text{样品}} - R_{\text{标准}}) / R_{\text{标准}}] \times 1000$. (1) 式中 $R_{\text{样品}}$ 和 $R_{\text{标准}}$ 分别表示测试样品和标准样品的碳同位素比值,同位素标准物为 VPDB.

1.3 气候数据获取

各样地的年均降雨量、月均降雨量、年均温度、月均温度和大于 0℃ 积温从全国陆地生态信息气象栅格数据库中提取得到. 生长季温度(GST)和生长季降雨量(GSP)分别通过式(2)和式(3)计算获得:

$$\text{GST} = \sum_{i=5}^9 \text{MMT}_i / 5, \quad (2)$$

$$\text{GSP} = \sum_{i=5}^9 \text{MMP}_i. \quad (3)$$

式中的 MMT_i 和 MMP_i 分别是第 i 月的月均温度和月均降雨量.

采样点干燥度指数(DI)通过式(4)计算:

$$\text{DI} = \frac{0.1 \sum \theta}{\text{MAP}}. \quad (4)$$

式中 $\sum \theta$ 是大于 0℃ 积温,MAP 是年均降雨量.

大气压强通过式(5)计算得到:

$$p = 101.325 / e^{[(z/29.3)/T_k]}. \quad (5)$$

式中: p 是大气压强, kPa; z 是海拔, m; T_k 是大气温度, K.

1.4 数据分析

采用 SPSS 18.0 软件进行数据统计分析. 采用简单回归分析叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 与海拔、经度、纬度、温度、降水和大气压强的关系. 采用多元回归分析确定气候因子对叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 的综合效应以及每个气候因子的贡献率.

2 结 果

2.1 C_3 植物叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 的空间格局

叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 随海拔升高而增大,随经纬度的增加而降低(图 2). 海拔每升高 1000 m,叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 增加 1.7‰,海拔、经度和纬度分别可以解释叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 的 27%, 46% 和 31% 的变化,可见对叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 的解释能力是:经度 > 纬度 > 海拔(图 2).

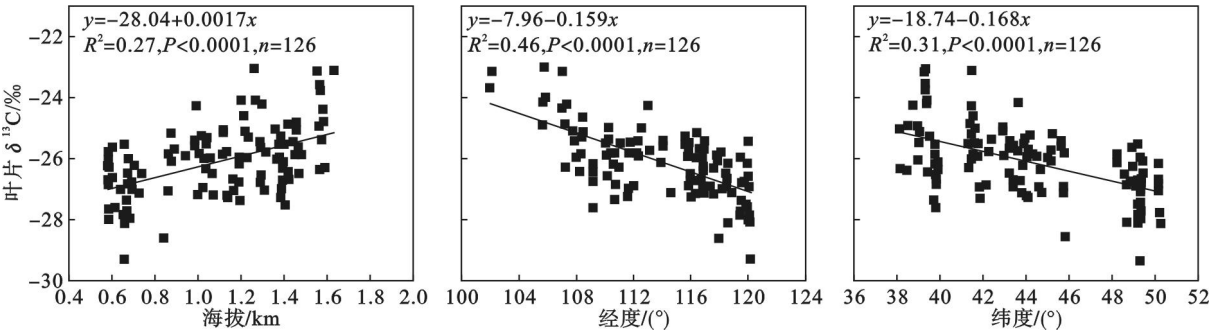


图 2 内蒙古 C_3 植物叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 的空间格局

Fig. 2 Spatial pattern of C_3 -plant foliar $\delta^{13}\text{C}$ in the Inner Mongolia

2.2 C₃ 植物叶片 δ¹³C 与气候因子的关系

叶片 δ¹³C 与年均温度(MAT)和生长季温度(GST)均显著正相关(图 3). MAT 和 GST 每升

高 1℃,叶片 δ¹³C 分别增大 0.222‰和 0.396‰. 此外, MAT 和 GST 分别可以解释叶片 δ¹³C 的 38% 和 40% 的变化.

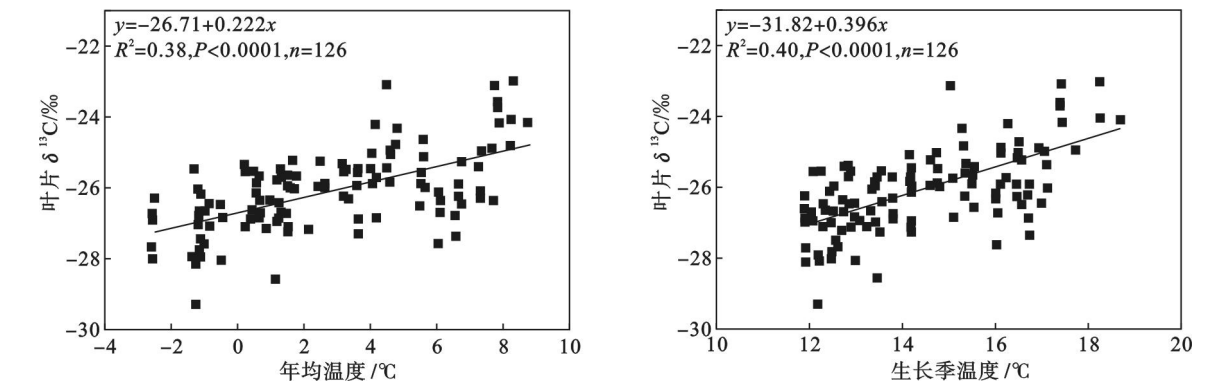


图 3 内蒙古 C₃ 植物叶片 δ¹³C 与温度的关系
Fig. 3 Relationship between C₃-plant foliar δ¹³C and temperature in the Inner Mongolia

叶片 δ¹³C 随年均降雨量(MAP)和生长季降雨量(GSP)的增加而减小,随干燥度的增加而增大(图 4). 水分有效性可解释叶片 δ¹³C 的 57% 变化. 水分有效性对植物叶片 δ¹³C 的解释能力强于

温度(图 3 和图 4). MAP 和 GSP 每增加 100 mm, C₃ 植物叶片 δ¹³C 分别降低 1.2‰和 1.4‰,而干燥度每增加 1 个当量, C₃ 植物叶片 δ¹³C 增大 1.723‰.

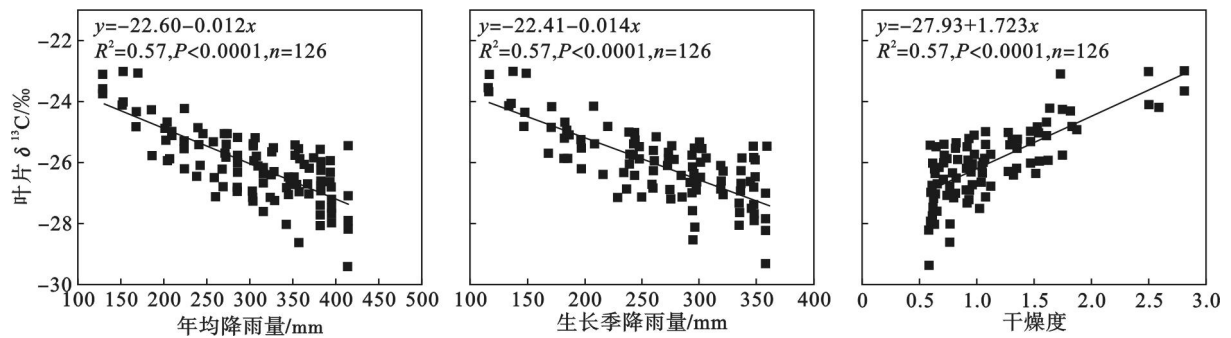


图 4 内蒙古 C₃ 植物叶片 δ¹³C 与水分有效性的关系
Fig. 4 Relationship between C₃-plant foliar δ¹³C and water availability in the Inner Mongolia

叶片 δ¹³C 随大气压强的增加而降低(图 5), 大气压每升高 1 kPa, 叶片 δ¹³C 降低 0.164‰. 大

气压可解释叶片 δ¹³C 的 27% 变化. 可见, 大气压对叶片 δ¹³C 的解释能力低于温度和降水(见图 3, 图 4 和图 5).

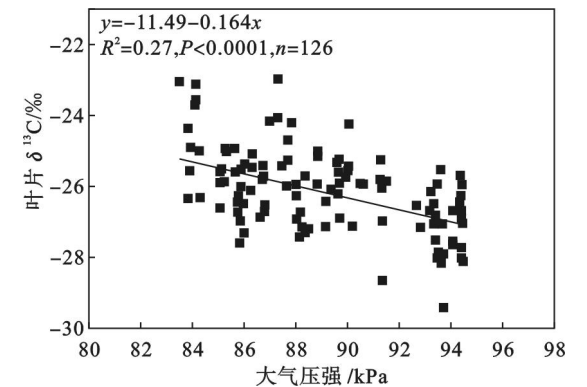


图 5 内蒙古 C₃ 植物叶片 δ¹³C 与大气压强的关系
Fig. 5 Relationship between C₃-plant foliar δ¹³C and atmospheric pressure in the Inner Mongolia

多元回归结果表明,在内蒙古地区,降水和大气压强均对叶片 δ¹³C 有显著影响,但降水的影响要强于大气压强,而温度没有影响(表 2).

表 2 内蒙古大气压强、温度、降水对 C ₃ 植物叶片 δ ¹³ C 变化的贡献率					
Table 2 Contribution of atmospheric pressure, temperature and precipitation to variation of C ₃ -plant foliar δ ¹³ C in the Inner Mongolia					
y	a	b	c	d	回归方程显著性
δ ¹³ C	-19.11**	-5.26*	-3.96**	1.18 ^{ns}	P < 0.000 1

注: 回归模型 $y = a + bx_1 + cx_2 + dx_3$, x_1, x_2, x_3 分别为大气压强、降水和温度. * 代表 $P < 0.05$; ** 代表 $P < 0.001$; ns 代表不显著.

3 讨 论

3.1 叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 与水分有效性的关系

叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 与降水显著负相关, 与干燥度显著正相关(图4), 这与现有大多数研究结果一致^[14-15]. 这是由于降雨量减少, 土壤含水量及空气湿度降低, 水分胁迫加重, 植物便会关闭部分叶片气孔以减少水分蒸发、提高水分利用效率, 而气孔是大气 CO_2 进入叶内的通道, 气孔部分关闭将引起叶片内 CO_2 浓度下降, 最终导致叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值升高^[16]. 多元回归结果也表明, 在内蒙古地区降水是影响叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 的主要因素(表2), 这是由于降水是该地区限制植物生长的主要因素; 而研究表明, 植物生长的限制因素往往是叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 的主要影响因素^[17].

3.2 叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 与温度的关系

叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 与温度正相关(图3), 这与现有一些研究结果相同^[18-19]. Farquhar 和 Wong^[20] 认为这是因为温度升高, 羧化酶活性增强, 植物光合速率增大, 导致植物叶片内 CO_2 浓度减小, 进而植物 $\delta^{13}\text{C}$ 增大. Li 等^[21] 认为还有一个可能的机制是: 温度升高导致土壤水分蒸发增强, 土壤含水量减少, 进而植物 $\delta^{13}\text{C}$ 增大. 但也有研究发现叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 与温度负相关^[7], 还有研究发现叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 与温度不相关^[22]. 可见, 温度与叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 之间的关系比较复杂, Schleser 等^[23] 认为, 不同植物具有不同的光合最适温度是导致植物 $\delta^{13}\text{C}$ 与温度之间关系非常复杂的原因. 多元回归结果表明, 实际上温度对植物 $\delta^{13}\text{C}$ 并没有影响(表2), 而它之所以与植物 $\delta^{13}\text{C}$ 正相关, 是由于在内蒙古地区温度与降水有显著的负相关关系(表1), 而降水与植物 $\delta^{13}\text{C}$ 显著负相关(图4和表2). 因此, 温度与叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 关系复杂另一个可能原因是: 在有些研究中温度可能并不是植物 $\delta^{13}\text{C}$ 的影响因素, 但它与影响植物 $\delta^{13}\text{C}$ 的主导因素显著相关, 且关系并不确定(例如, 在不同区域, 温度与降水可能存在正相关、负相关和不相关的关系), 最终导致了植物 $\delta^{13}\text{C}$ 值与温度之间关系的复杂多变.

3.3 叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 与大气压强的关系

叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 与大气压强显著负相关(图5), 这与 Zhou 和 Li 等在青藏高原得到的研究结果相同^[9,24]. 这可能是因为, 随着大气压强降低, 大气 CO_2 分压降低, 导致了较低的大气 CO_2 浓度. 而 Llorens 等^[25] 研究发现, 在低 CO_2 浓度条件下植物 C_i/C_a 低于在高 CO_2 浓度条件下. 这可能正是

导致叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 与大气压强负相关的原因. 多元回归结果表明, 虽然大气压强是叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 的影响因素, 但是与降水相比大气压强并不是主要影响因素(表2), 这可能是由于与降水相比, 大气压强并不是限制植物生长的主要因素. 另外, 经度对内蒙古植物叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 的解释能力高于海拔(图2), 也说明了水分对植物叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 的影响要大于大气压强, 这是因为, 大气压强与海拔的相关性要强于经度, 而降水与经度的相关性要强于海拔(表1), 如果大气压强是影响植物叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 的主要因素, 那么应该是海拔对植物叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 的解释能力高于经度.

3.4 内蒙古地区 C_3 植物叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 的空间格局

叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 随海拔升高而增大(图2a), 这一规律与前人研究结果相同^[6,8-9]. 本研究中叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 随海拔的变化率是 1.7‰ km^{-1} , 这一变化率高于 Zhou 等^[9] 在青藏高原以及 Körner 等^[26] 在全球高海拔地区得到的变化率(分别为 0.78‰ km^{-1} 和 0.70‰ km^{-1}). 物种特异性可以解释不同研究区得到的变化率不同. 叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 对海拔的响应程度具有物种特异性已经被广泛发现. Hultine 和 Marshall^[27] 发现不同物种随海拔的变化率存在显著差异, 洛杉矶冷杉 (*Abies lasiocarpa*) 的变化率只有 0.91‰ km^{-1} , 而小干松 (*Pinus contorta*) 的变化率高达 2.68‰ km^{-1} . Zhu 等^[6] 发现委陵菜属 (*Potentilla*) 和苔草属 (*Carex*) 植物叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 随海拔的变化率是 1.2‰ km^{-1} , 而虎耳草属 (*Saxifraga*) 植物叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 随海拔的变化率是 1.8‰ km^{-1} . 每一个研究区具有不同优势种, 因此叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 随海拔的变化率也不同. 此外, 不同区域引起植物叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 随海拔变化的主导因子不同也是导致植物叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 随海拔变化率不同的一个可能解释. 在青藏高原, 大气压强是影响叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 的主导因素^[9], 而在内蒙古地区, 水分是影响叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 的主导因素(表2).

关于叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 与经、纬度之间关系的研究相对较少, 并且得到的结果也不尽相同. 本研究结果表明叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 与经纬度负相关, 这与 Pedicino 等^[28] 在美国西南部的研究结果相同. 但也有研究发现经度和纬度与植物 $\delta^{13}\text{C}$ 正相关. 例如, 刘光琇等^[29] 发现中国西部沙棘 (*Hippophae rhamnoides*) $\delta^{13}\text{C}$ 随经度和纬度的升高而增大. 而冯虎元等^[17] 研究发现植物 $\delta^{13}\text{C}$ 与经度负相关, 而与纬度呈弱的正相关关系. 也有研究只分析了叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 与纬度或经度其中一个因素的关系, Körner 等^[8] 研究发现多年生草本植物叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 与纬度负相关. 刘光琇等^[29] 认为, 不同研究得到

的结果不同,可能是由于不同研究的采样策略有所不同,或是不同植物种对环境的适应性有所不同。本研究表明另一个可能原因是:在不同研究区影响植物叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 的主导因素不同,而这些主导因素在不同地区随经纬度的变化规律也可能不同,最终导致了不同研究得到植物叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 随经纬度的变化规律不尽相同。

4 结 语

内蒙古地区, C_3 植物叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 具有显著的空间格局,表现为:叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 随海拔升高而增大,随经纬度的增加而减小。降水和大气压强与叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 显著负相关,它们共同决定了叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 的空间格局,其中水分是主导因素,而温度对叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 影响不显著。

参考文献:

- [1] Diefendorf A F, Mueller K E, Wing S L, et al. Global patterns in leaf ^{13}C discrimination and implications for studies of past and future climate[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2010, 107(13): 5738–5743.
- [2] Peri P L, Ladd B, Pepper D A, et al. Carbon ($\delta^{13}\text{C}$) and nitrogen ($\delta^{15}\text{N}$) stable isotope composition in plant and soil in Southern Patagonia's native forests[J]. *Global Change Biology*, 2012, 18(1): 311–321.
- [3] Farquhar G D, O'Leary M H, Berry J A. On the relationship between carbon isotope discrimination and the inter-cellular carbon-dioxide concentration in leaves [J]. *Australian Journal of Plant Physiology*, 1982, 9(2): 121–137.
- [4] Dawson T E, Mambelli S, Plamboeck A H, et al. Stable isotopes in plant ecology[J]. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 2002, 33: 507–559.
- [5] Shi Z, Liu S, Liu X, et al. Altitudinal variation in photosynthetic capacity, diffusional conductance and $\delta^{13}\text{C}$ of butterfly bush (*Buddleja davidii*) plants growing at high elevations[J]. *Physiologia plantarum*, 2006, 128(4): 722–731.
- [6] Zhu Y, Siegwolf R T W, Durka W, et al. Phylogenetically balanced evidence for structural and carbon isotope responses in plants along elevational gradients[J]. *Oecologia*, 2010, 162(4): 853–863.
- [7] Zheng S, Shangguan Z. Spatial patterns of foliar stable carbon isotope compositions of C_3 plant species in the Loess Plateau of China[J]. *Ecological Research*, 2007, 22(2): 342–353.
- [8] Kömer C, Farquhar G, Wong S. Carbon isotope discrimination by plants follows latitudinal and altitudinal trends[J]. *Oecologia*, 1991, 88(1): 30–40.
- [9] Zhou Y, Fan J, Zhang W, et al. Factors influencing altitudinal patterns of C_3 plant foliar carbon isotope composition of grasslands on the Qinghai-Tibet Plateau, China[J]. *Alpine Botany*, 2011, 121: 79–90.
- [10] Zhou Y C, Fan J W, Zhong H P, et al. Relationships between altitudinal gradient and plant carbon isotope composition of grassland communities on the Qinghai-Tibet Plateau, China [J]. *Science China Earth Sciences*, 2013, 56(2): 311–320.
- [11] Van de Water P K, Leavitt S W, Betancourt J L. Leaf $\delta^{13}\text{C}$ variability with elevation, slope aspect, and precipitation in the southwest United States[J]. *Oecologia*, 2002, 132(3): 332–343.
- [12] Chen S, Bai Y, Han X. Variation of water use efficiency of *Leymus chinensis* and *Cleistogenes squarrosa* in different plant communities in Xilin River Basin, Nei Mongol [J]. *Acta Botanica Sinica*, 2002, 44(12): 1484–1490.
- [13] 韩彬, 樊江文, 钟华平. 内蒙古草地样带植物群落生物量的梯度研究[J]. 植物生态学报, 2006, 30(4): 553–562.
(Han Bin, Fan Jiang-wen, Zhong Hua-ping. Grassland biomass of communities along gradient of the Inner Mongolia grassland transect [J]. *Journal of Plant Ecology*, 2006, 30(4): 553–562.)
- [14] Murphy B P, Bowman D M J S. The carbon and nitrogen isotope composition of Australian grasses in relation to climate[J]. *Functional Ecology*, 2009, 23(6): 1040–1049.
- [15] Schulze E, Turner N, Nicolle D, et al. Leaf and wood carbon isotope ratios, specific leaf areas and wood growth of *Eucalyptus* species across a rainfall gradient in Australia[J]. *Tree Physiology*, 2006, 26(4): 479–492.
- [16] Morecroft M D, Woodward F I. Experimental investigations on the environmental determination of $\delta^{13}\text{C}$ at different altitudes [J]. *Journal of Experimental Botany*, 1990, 41(10): 1303–1308.
- [17] 冯虎元, 安黎哲, 陈拓, 等. 马先蒿属 (*Pedicularis* L.) 植物稳定碳同位素组成与环境因子之间的关系 [J]. 冰川冻土, 2003, 25(1): 88–93.
(Feng Hu-yuan, An Li-zhe, Chen Tuo, et al. The relationship between foliar stable carbon isotope composition in *Pedicularis* L. and environmental factors [J]. *Journal of Glaciology Geocryology*, 2003, 25(1): 88–93.)
- [18] Loader N, Hemming D. Spatial variation in pollen $\delta^{13}\text{C}$ correlates with temperature and seasonal development timing [J]. *The Holocene*, 2001, 11(5): 587–592.
- [19] Saurer M, Siegenthaler U, Schweingruber F. The climate-carbon isotope relationship in tree rings and the significance of site conditions [J]. *Tellus Series B—Chemical and Physical Meteorology*, 1995, 47(3): 320–330.
- [20] Farquhar G D, Wong S C. An empirical-model of stomatal conductance [J]. *Australian Journal of Plant Physiology*, 1984, 11(3): 191–209.
- [21] Li C Y, Wu C C, Duan B L, et al. Age-related nutrient content and carbon isotope composition in the leaves and branches of *Quercus aquifolioides* along an altitudinal gradient[J]. *Trees*, 2009, 23(5): 1109–1121.
- [22] Morecroft M D, Woodward F I, Marrs R H. Altitudinal trends in leaf nutrient contents, leaf size and $\delta^{13}\text{C}$ of *Alchemilla alpina* [J]. *Functional Ecology*, 1992, 6(6): 730–740.

(下转第 284 页)