

DOI:10.7522/j.issn.1000-0240.2022.0105

WANG Shuyuan, FAN Yijiao, YANG Junhuai, et al. A preliminary study on the variation of stable carbon isotope in surface soil and its influencing factors in the upper and middle reaches of Yarlung Zangbo River[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2022, 44(4):1130-1139. [王树源, 范义姣, 杨军怀, 等. 雅鲁藏布江中上游地区表土碳同位素变化及其影响因素初探[J]. 冰川冻土, 2022, 44(4):1130-1139.]

雅鲁藏布江中上游地区表土碳同位素变化 及其影响因素初探

王树源¹, 范义姣¹, 杨军怀¹, 陈梓炫¹, 田伟东¹, 高福元², 夏敦胜¹

(1. 兰州大学 资源环境学院 西部环境教育部重点实验室, 甘肃 兰州 730000; 2. 兰州城市学院 城市环境学院, 甘肃 兰州 730070)

摘 要: 土壤有机碳同位素组成($\delta^{13}\text{C}$)记录的环境信息对研究气候与环境变化至关重要, 然而高海拔地区土壤 $\delta^{13}\text{C}$ 对气候变化的响应机制尚不明确。对青藏高原南部雅鲁藏布江中上游地区(海拔3 500~5 100 m)的36个表土样品进行了 $\delta^{13}\text{C}$ 系统分析, 并讨论了其对气候因素的响应。结果表明: 表土 $\delta^{13}\text{C}$ 值分布在 -24.6‰ ~ -15.2‰ 范围之间, 平均值为 -20.8‰ , 指示了地上植被为 C_3/C_4 混合植被类型。随着海拔的升高, C_4 植物比例减少, C_3 植物比例增加, 这种比例变化主导了该区域表土 $\delta^{13}\text{C}$ 的组成差异。海拔每升高100 m, $\delta^{13}\text{C}$ 值偏负 0.5‰ 。进一步分析说明, 生长季温度可能是影响该区域表土 $\delta^{13}\text{C}$ 变化的主要气候因子, 降水、大气压等对 $\delta^{13}\text{C}$ 值的贡献较低。

关键词: 碳同位素; 温度; 降水; 表土; 雅鲁藏布江

中图分类号: P597; O628.2¹ **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-0240(2022)04-1130-10

0 引言

依据光合作用路径的不同, 自然界的陆生植物可分为三大类: C_3 植物、 C_4 植物及景天酸代谢植物(CAM型)。 C_3 植物的 $\delta^{13}\text{C}$ 值在 -34‰ ~ -20‰ 间变化, 以 -27‰ 附近出现的频率最高; C_4 植物的 $\delta^{13}\text{C}$ 值在 -19‰ ~ -9‰ 间变化, 以 -13‰ 附近出现的频率最高。CAM型植物的 $\delta^{13}\text{C}$ 值变化范围比较宽, 为 -10‰ ~ -30‰ , 基本上覆盖了整个 C_3 和 C_4 植物的区间^[1-2]。土壤有机质主要来自于地上植被, 记录了不同空间和时间尺度上的植物同位素分馏, 因此, 土壤有机碳同位素($\delta^{13}\text{C}$)与植物碳同位素具有直接关系^[1-3]。

植物在土壤中的转化过程中存在复杂的同位素分馏过程, 不同地区分馏值存在一定差异, 总体介于 0.5‰ ~ 2.5‰ 之间^[4-6]。不同气候条件下土壤的 $\delta^{13}\text{C}$ 可以记录环境信息, 综合反映植物的生理生态特征, 是研究植被和气候关系的理想材料^[7-9]。此

外, 对土壤 $\delta^{13}\text{C}$ 的分析可以重建古环境, 特别是利用沉积物 $\delta^{13}\text{C}$ 的变化特征进行古环境的定量重建^[3,10-11]。国内外学者在全球和区域尺度上对植物、土壤的 $\delta^{13}\text{C}$ 与气候因子(如降水、温度、大气压等)的关系进行了深入研究^[12-19], 多数研究已证实 C_3 植物主导下的土壤 $\delta^{13}\text{C}$ 值与降水之间呈负相关, 并且这种负相关关系已被应用于中国黄土高原^[20], 中亚地区^[21-22], 中国北方^[23-24]以及青藏高原东部^[25]等地区的降水重建, 但也有少数研究发现二者之间不是简单的线性关系甚至不相关^[26-27]。与 C_3 植物不同, Rao等^[10]发现全球范围内 C_4 植物的 $\delta^{13}\text{C}$ 值与MAP显著正相关。然而, 有研究认为温度是决定 C_3/C_4 相对丰度从而影响土壤 $\delta^{13}\text{C}$ 的主要气候因子, 并将 $\delta^{13}\text{C}$ 作为温度指标应用于受季风影响的边缘地区^[28]、东北地区 and 黄土高原^[29-30]以及青藏高原东南部地区^[31]。此外, 海拔对 $\delta^{13}\text{C}$ 的影响显著, 但由于高海拔地区地域差异明显, 温度、降水及大气压等气

收稿日期: 2021-06-02; 修订日期: 2021-08-24

基金项目: 第二次青藏高原综合科学考察研究项目“粉尘气溶胶及其气候环境效应”(2019QZKK0602)资助

作者简介: 王树源, 博士研究生, 主要从事环境和气候变化研究. E-mail: wangshy19@lzu.edu.cn

通信作者: 夏敦胜, 教授, 主要从事环境磁学和气候变化研究. E-mail: dsxia@lzu.edu.cn

候指标的综合影响使得 $\delta^{13}\text{C}$ 的变化特征较为复杂^[30-34]。多数研究表明植物或土壤 $\delta^{13}\text{C}$ 随海拔上升而变重^[13-14, 19, 34],但受局部地区微生境的影响可能出现负相关或变化趋势不明显^[35-36]。也有研究发现表土 $\delta^{13}\text{C}$ 随海拔呈先变轻后变重的规律,海拔拐点处水热条件的突变可能是引起 $\delta^{13}\text{C}$ 发生转折性改变的主要原因,但不同研究中海拔拐点不同,如3 500 m^[32]、2 960 m^[33]、2 050 m^[37]等。

雅鲁藏布江(简称雅江)流域位于青藏高原南部,受西风和印度季风的共同作用^[38]。植被垂直地带性分布和水热梯度使得该区域为研究土壤 $\delta^{13}\text{C}$ 的空间变化特征和气候驱动因素提供了理想的区域。基于此,本文采集了雅江中上游地区36个表土样品,通过测定 $\delta^{13}\text{C}$,结合现代气象观测资料,旨在阐明现代土壤 $\delta^{13}\text{C}$ 随海拔和区域气候条件变化的规律,并探讨该地区表土 $\delta^{13}\text{C}$ 的控制因素,明确其气候

指示意义,为后续利用地层沉积物 $\delta^{13}\text{C}$ 重建古植被、古气候提供基础支撑数据。

1 研究区概况

雅江位于青藏高原南部(图1),地理坐标为28°59'~30°34' N,82°32'~94°28' E,中国境内流域全长约2 057 km,属高原温带季风区湿润-半干旱气候^[39-40]。研究区主要集中于雅江中上游地区日喀则地区和山南地区,海拔范围为3 500~5 100 m。其中日喀则地区年平均气温为5.5℃,年平均降水量为369.8 mm;山南段年平均气温为7.0℃,年降水量为441.7 mm。土壤类型主要以(亚)高山草甸土、(亚)高山草原土和山地灌丛草原土为主,自然植被低矮稀疏,以砂生槐[*Sophora moorcroftiana* (Benth.) Baker]、固沙草(*Orinus thoroldii*)和白草(*Pennisetum centrasiaticum* Tzvel)等灌木、半灌木、草本为主^[41]。

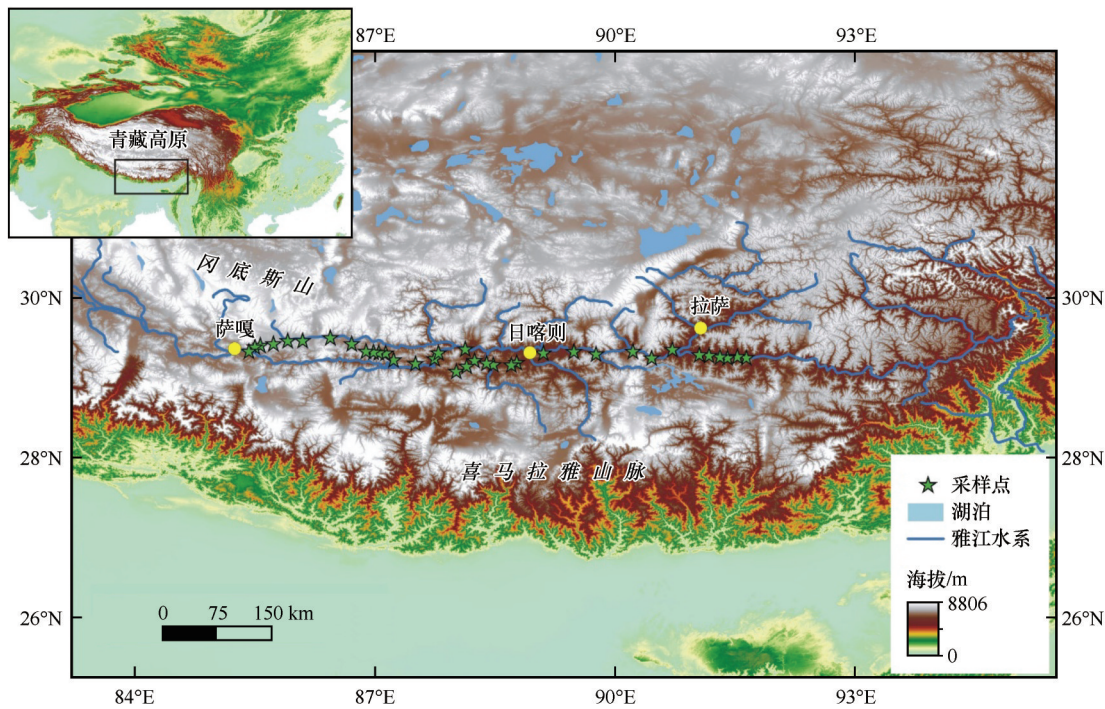


图1 雅鲁藏布江中上游地区地理位置
Fig. 1 Geographical location in the upper and middle reaches of Yarlung Zangbo River

2 样品采集与实验方法

2.1 样品采集

通过野外考察,在雅江中上游地区共采集了36份表土样品(图1)。采样地点选择远离耕地和城镇村庄,没有受人类干扰并且自然植被稳定,植物优势种典型分布的地区。采样时去除表土最上层凋

落物,采样深度为0~5 cm,利用便携式GPS记录采样点的经纬度和海拔,同时记录了采样点的优势植物种信息。年平均降水量(MAP)和年平均气温(MAT)数据来源于国家青藏高原科学数据中心的“青藏高原及周边地区气温和降水格点数据(1998—2017)”^[42]。该数据集基于国家气象信息中心基础资料专项最新整编的中国地面高密度台站

(2400 多个国家级气象观测站)的气温和降水日值资料,对缺测站点进行预处理之后,利用 ANUSPLIN 软件的薄盘样条法(Thin Plate Spline)进行空间插值,最后生成空间分辨率为 1 km 的年值格点数据,可以更好地反映高原地区真实的温度和降水变化。生长季温度来源于 <https://worldclim.org/data/index.html>,干燥度数据来源于 <https://doi.org/10.6084/m9.figshare.7504448.v3>^[43]。此外,CO₂分压通过大气压乘以常数(335 μmol·mol⁻¹)获得,大气压根据以下公式计算^[44]:

$$P=101.325/e^{[(z/29.3)/TK]} \quad (1)$$

式中: P 为大气压(kPa); z 为海拔(m); TK 为空气温度(K)。

2.2 实验方法

有机碳同位素($\delta^{13}\text{C}$)实验具体方法如下:

(1)用镊子挑去土壤样品中的植物残体、沙砾等,然后在玛瑙研钵中研磨,过 100 目筛。取一定量研磨好的样品置于透水坩埚中,至坩埚体积的 2/3 处即可。室温下,将装有样品的透水坩埚放入培养皿中,加入 2 mol·L⁻¹的 HCl 反应 6 h 左右。然后将培养皿转移到 80 ℃恒温水浴锅之中反应 2~3 h,以完全去除样品中碳酸盐物质。

(2)充分反应后,用蒸馏水将样品反复清洗至 pH>5,随后将样品放入低于 80 ℃的烘箱中完全烘干。将烘干的样品重新在玛瑙研钵中研磨,直到均匀并无颗粒感,包好磨好的样品并存放在干燥箱中。样品前处理在兰州大学西部环境教育部重点实验室进行。

(3)用燃烧法收集完全燃烧后产生的 CO₂,采用元素分析仪-稳定同位素比率质谱仪(EA-IRMS)分析碳同位素组成。根据黄土有机质含量称取样品 2~4 g,送入 Flash EA 2000 型元素分析仪进行在线分析。在该系统中,样品在 960 ℃的氧化炉通氧环境下瞬间高温燃烧,后流经 680 ℃的还原炉,释放 CO₂和 N₂气体,经色谱填充柱分离出 CO₂气体,由载 He 气将 CO₂气体带入 MAT-253 同位素比值质谱仪进行碳同位素测定。样品中有机碳同位素 $\delta^{13}\text{C}$ 表示为:

$$\delta^{13}\text{C}(\text{‰})=[(R_{\text{样品}}-R_{\text{标准}})/R_{\text{标准}}]\times 1000 \quad (2)$$

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 ¹³C/¹²C 的比值。所有的碳同位素组成均采用 VP-DB 标准。样品的 $\delta^{13}\text{C}$ 分析在兰州大学草地农业科技学院国家重点实验室进行。

3 结果与讨论

3.1 C₃和 C₄植物分布对表土 $\delta^{13}\text{C}$ 的影响

雅江中上游地区不同海拔 36 个表土样品的碳同位素组成结果表明,该地区表土的 $\delta^{13}\text{C}$ 值存在很大差异,总体分布在 -24.6‰~-15.2‰ 范围之间,平均值为 -20.8‰(表 1)。现代土壤的同位素组成主要与地表植被类型密切相关,C₃植物与 C₄植物的比例变化会造成土壤 $\delta^{13}\text{C}$ 的组成特征存在差异^[13,18,31-34]。C₃和 C₄植物碳同位素组成(即 $\delta^{13}\text{C}_3$ 和 $\delta^{13}\text{C}_4$)的平均值可以被直接用来计算 C₄植物比例的变化,即 $C_4(\%)=[(\delta^{13}\text{C}-\delta^{13}\text{C}_3)/(\delta^{13}\text{C}_4-\delta^{13}\text{C}_3)]\times 100$ 。黄土高原中部纯 C₃和 C₄植物对应的 $\delta^{13}\text{C}$ 值分别是 -24‰和 -14‰^[11],川西高原纯 C₃和 C₄植物的 $\delta^{13}\text{C}$ 值分别为 -25‰和 -12‰^[25],虽然不同研究中纯 C₃和 C₄植物 $\delta^{13}\text{C}$ 值不同,但总体趋势几乎相同。通过对比已知 C₃和 C₄植物的 $\delta^{13}\text{C}$ 值^[2],本研究区表土 $\delta^{13}\text{C}$ 值直方图体现出较显著的 C₄植物贡献信号(图 2),特别是在海拔 3 500~4 000 m 之间多个采样点的 $\delta^{13}\text{C}$ 值在 -15‰到 -20‰之间,且 C₄植物比例平均值高达 58.2%(表 1)。同时,地表植被调查结果也发现在该海拔范围内,生长着禾本科,如固沙草(*Orinus thoroldii*)、白草(*Pennisetum centrasiaticum* Tzvel)等 C₄植物(表 1),这与表土 $\delta^{13}\text{C}$ 值表现出很好的一致性。

全球不同光合类型草本植物的分布表明,C₄草本植物生长的温度阈值是年平均气温(MAT)大于 12 ℃^[10]。本研究区采样点平均海拔为 4 000 m, MAT 均低于 12 ℃,却依旧存在较高的 C₄/C₃植物比例。旺罗等^[45]在青藏高原南部也发现一些 C₄植物的生长高度可以达到海拔 4 000 m 以上,最高可达 4 520 m。他认为这是由于青藏高原强光照以及夏季集中降水等特殊气候条件可能有利于 C₄植物的生长^[46]。青藏高原年平均总辐射在 3 800~8 600 MJ·m⁻²之间^[47]。强光照为 C₄植物进行双羧酸循环提供了足够的能量,使其在低 CO₂/O₂条件下进行 CO₂同化,并补偿了低温下光合作用所需的能量,最后可能导致即使在较高海拔地区,C₄植物仍具有较高的固碳效率以及对低温的耐受力^[46,48]。此外,C₄植物比 C₃植物具有更高的水分利用效率,春季的干旱往往限制了 C₃植物的生长,这使得夏季集中降水不仅为 C₄植物提供了充足的水分,而且也为 C₄植物提供了充足的生长空间^[46]。然而,随着海拔继续升高,C₄植物比例降低,如砂生槐 [*Sophora moorcroftiana*

(Benth.) Baker], 锦 鸡 儿 [*Caragana sinica* (Buc’hoz) Rehder] 等 C₃ 植物比例逐渐升高, 表土 δ¹³C 值也逐渐偏负。已有研究证实, 相对于 C₄ 植物, C₃ 植物在低温和高海拔条件下更具竞争优势^[3,31,49]。显然, 植物光合作用类型逐渐由 C₃ 植物主导, 表土 δ¹³C 值偏负。

表 1 雅江中上游地区各采样点经纬度、海拔、表土 δ¹³C、C₄ 植物比例、C₄、C₃ 植物优势种、植被类型及土壤类型
Table 1 Latitude, longitude, altitude, surface soil δ¹³C, ratio of C₄ plants, the C₄、C₃ plant species, vegetation type and soil type of sampling points in the upper and middle reaches of Yarlung Zangbo River

样品 编号	纬度/N	经度/E	海拔/m	δ ¹³ C/‰	C ₄ 植物 比例/%	C ₄ 植物优势种	C ₃ 植物优势种	植被类型	土壤类型
1	29°15′	91°38′	3 528	-18. 3	51. 8	白草(<i>Pennisetum centra- siaticum</i> Tzvel)	垂穗披碱草(<i>Elymus nutans</i> Griseb)	白草草原	山地灌丛草 原土
2	29°16′	91°32′	3 538	-16. 3	67. 1	白草(<i>Pennisetum centra- siaticum</i> Tzvel)	垂穗披碱草(<i>Elymus nutans</i> Griseb)	白草草原	山地灌丛草 原土
3	29°15′	91°24′	3 532	-17. 7	55. 8	白草(<i>Pennisetum centra- siaticum</i> Tzvel)	小角柱花(<i>Ceratostigma minus</i>)	小角柱花-白 草灌丛草原	山地灌丛草 原土
4	29°15′	91°18′	3 542	-21. 8	24. 4	白草(<i>Pennisetum centra- siaticum</i> Tzvel)	小角柱花(<i>Ceratostigma minus</i>)、 小叶杨(<i>Populus simonii</i> Carr)	小角柱花-白 草灌丛草原	山地灌丛草 原土
5	29°16′	91°10′	3 543	-16. 0	69. 6	白草(<i>Pennisetum centra- siaticum</i> Tzvel)	紫花针茅(<i>Stipa purpurea</i> Griseb)、 小角柱花(<i>Ceratostigma minus</i>)	小角柱花-白 草灌丛草原	山地灌丛草 原土
6	29°17′	91°03′	3 549	-16. 3	66. 7	白草(<i>Pennisetum centra- siaticum</i> Tzvel)	紫花针茅(<i>Stipa purpurea</i> Griseb)、 小角柱花(<i>Ceratostigma minus</i>)	小角柱花-白 草灌丛草原	山地灌丛草 原土
7	29°21′	90°43′	3 551	-18. 7	48. 6	三刺草(<i>Aristida trisetata</i> Keng)	紫花针茅(<i>Stipa purpurea</i> Griseb)	三刺草草原	山地灌丛草 原土
8	29°15′	90°27′	3 635	-15. 2	75. 6	三刺草(<i>Aristida trisetata</i> Keng)	紫花针茅(<i>Stipa purpurea</i> Griseb)	三刺草草原	山地灌丛草 原土
9	29°19′	90°13′	3 691	-20. 3	36. 2	三刺草(<i>Aristida trisetata</i> Keng)	锦 鸡 儿 (<i>Caragana sinica</i> (Buc’hoz) Rehder)	锦 鸡 儿-三刺 草灌丛草原	山地灌丛草 原土
10	29°18′	89°46′	3 764	-17. 1	60. 5	早熟禾(<i>Poa annua</i> L.)	垂穗披碱草(<i>Elymus nutans</i> Griseb)	早熟禾草原	高山草原土
11	29°19′	89°29′	3 760	-21. 1	30. 2	早熟禾(<i>Poa annua</i> L.)	紫花针茅(<i>Stipa purpurea</i> Griseb)	紫花针茅草原	高山草原土
12	29°18′	89°06′	3 810	-20. 7	32. 9	固沙草(<i>Orinus thoroldii</i>)	紫花针茅(<i>Stipa purpurea</i> Griseb)	紫花针茅草原	高山草原土
13	29°21′	88°07′	3 876	-22. 6	18. 8	固沙草(<i>Orinus thoroldii</i>)	紫花针茅(<i>Stipa purpurea</i> Griseb)	紫花针茅草原	高山草原土
14	29°11′	88°46′	3 868	-19. 1	45. 6	早熟禾(<i>Poa annua</i> L.)	紫花针茅(<i>Stipa purpurea</i> Griseb)	早熟禾草原	高山草原土
15	29°09′	88°42′	3 899	-18. 2	52. 1	早熟禾(<i>Poa annua</i> L.)	紫花针茅(<i>Stipa purpurea</i> Griseb)	早熟禾草原	高山草原土
16	29°09′	88°28′	3 915	-23. 4	12. 5	固沙草(<i>Orinus thoroldii</i>)	锦 鸡 儿 (<i>Caragana sinica</i> (Buc’hoz) Rehde)	锦 鸡 儿-固沙 草灌丛草原	高山草原土
17	29°11′	88°23′	3 883	-16. 7	63. 8	固沙草(<i>Orinus thoroldii</i>)	锦 鸡 儿 (<i>Caragana sinica</i> (Buc’hoz) Rehde)	固沙草草原	高山草原土
18	29°13′	88°14′	3 955	-21. 1	41. 1	无记录	西藏蒿草(<i>Kobresia tibetica</i>)	西藏蒿草草甸	高山草甸土
19	29°08′	88°09′	4 044	-22. 5	24. 4	无记录	西藏蒿草(<i>Kobresia tibetica</i>)	西藏蒿草草甸	高山草甸土
20	29°05′	88°01′	4 235	-23. 1	30. 1	无记录	西藏蒿草(<i>Kobresia tibetica</i>)	西藏蒿草草甸	高山草甸土
21	29°14′	87°44′	3 915	-19. 7	19. 0	固沙草(<i>Orinus thoroldii</i>)	西藏沙棘(<i>Hippophae thibetana</i> Schlechtend)	固沙草草原	高山草原土
22	29°18′	87°47′	3 914	-21. 8	14. 8	固沙草(<i>Orinus thoroldii</i>)	砂生槐(<i>Sophora moorcroftiana</i> (Benth.) Baker)	固沙草草原	高山草原土
23	29°10′	87°30′	4 122	-20. 2	37. 0	固沙草(<i>Orinus thoroldii</i>)	砂生槐(<i>Sophora moorcroftiana</i> (Benth.) Baker)	固沙草草原	高山草原土
24	29°13′	87°14′	4 336	-21. 3	28. 6	固沙草(<i>Orinus thoroldii</i>)	砂生槐(<i>Sophora moorcroftina</i> (Benth.) Baker)	固沙草草原	高山草原土
25	29°18′	87°08′	4 272	-21. 9	23. 6	固沙草(<i>Orinus thoroldii</i>)	锦 鸡 儿 (<i>Caragana sinica</i> (Buc’hoz) Rehder)	锦 鸡 儿荒漠化 灌丛	高原草原化 荒漠土

续表1

样品 编号	纬度/N	经度/E	海拔/m	$\delta^{13}\text{C}/\text{‰}$	C ₄ 植物 比例/%	C ₄ 植物优势种	C ₃ 植物优势种	植被类型	土壤类型
26	29°18′	87°03′	4 403	-21.5	27.1	无记录	锦鸡儿(<i>Caragana sinica</i> (Buc'hoz) Rehder)	锦鸡儿荒漠化 灌丛	高原草原化 荒漠土
27	29°19′	86°59′	4 429	-23.6	10.5	无记录	锦鸡儿(<i>Caragana sinica</i> (Buc'hoz) Rehder)	锦鸡儿荒漠化 灌丛	高原草原化 荒漠土
28	29°20′	86°53′	4 578	-24.0	7.7	无记录	锦鸡儿(<i>Caragana sinica</i> (Buc'hoz) Rehder)	锦鸡儿荒漠化 灌丛	高原草原化 荒漠土
29	29°25′	86°42′	4 560	-23.8	9.2	无记录	西藏沙棘(<i>Hippophae thibetana</i> Schlechtend)	西藏沙棘荒漠 化灌丛	高原草原化 荒漠土
30	29°30′	86°26′	4 698	-23.7	9.7	无记录	西藏沙棘(<i>Hippophae thibetana</i> Schlechtend)	西藏沙棘荒漠 化灌丛	高寒荒漠土
31	29°28′	86°06′	5 048	-24.1	7.1	无记录	匍匐水柏枝(<i>Myricaria prostrata</i> Hook. F. et Thoms. ex Benth)	匍匐水柏枝荒 漠化灌丛	高寒荒漠土
32	29°27′	85°54′	4 887	-23.8	8.9	无记录	匍匐水柏枝(<i>Myricaria prostrata</i> Hook. F. et Thoms. ex Benth)	匍匐水柏枝荒 漠化灌丛	高寒荒漠土
33	29°25′	85°44′	4 950	-23.9	8.5	无记录	垫状驼绒藜(<i>Ceratoides compacta</i>)	垫状驼绒藜荒 漠化灌丛	高寒荒漠土
34	29°24′	85°34′	4 846	-24.6	3.20	无记录	无记录	无记录	高寒荒漠土
35	29°23′	85°30′	4 672	-22.3	20.8	无记录	无记录	无记录	高寒荒漠土
36	29°20′	85°25′	4 543	-21.7	25.6	无记录	无记录	无记录	高寒荒漠土

注：表中植物种通过《中国植物志》^[50] 进行鉴定，土壤类型判别参考赵健和李蓉^[41] 及《西藏土壤分类》^[51]。

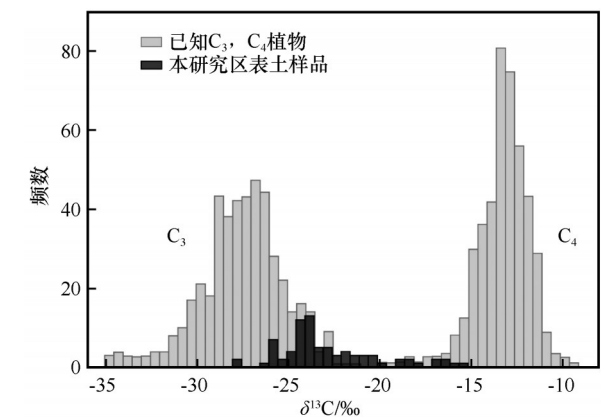


图2 雅江中上游表土 $\delta^{13}\text{C}$ 值直方图(已知C₃、C₄植物
资料来源于O'Leary, 1988^[2])

Fig. 2 Histogram of the $\delta^{13}\text{C}$ values of surface soils in the
upper and middle reaches of Yarlung Zangbo River
(Known C₃, C₄ plants from O'Leary, 1988^[2])

3.2 海拔对表土 $\delta^{13}\text{C}$ 的影响

Morecrof 和 Woodward^[52]认为,在全球范围内,C₃植物 $\delta^{13}\text{C}$ 值与海拔高度成正相关关系,但植物 $\delta^{13}\text{C}$ 会受到局地生境的影响,从而出现负相关或不相关的情况。与前人研究所发现的高原表土 $\delta^{13}\text{C}$ 随海拔上升呈先变轻后变重的规律不同^[30,33-34,37],本研究成果显示雅江中上游地区,海拔3 500~5 100 m范围内,表土 $\delta^{13}\text{C}$ 值随海拔升高而偏负,海拔每升高

100 m, $\delta^{13}\text{C}$ 值 偏 负 0.5‰ [$R^2=0.61$, $P<0.01$, 图 3 (a)]。一方面,青藏高原面积广泛,不同区域影响因素复杂,本研究区集中于高原南部雅江河谷中上游地区,更好地反映了高原南部表土 $\delta^{13}\text{C}$ 的空间变化特征及其影响因素。另一方面,不同于前人研究中植被类型以C₃植物占绝对优势^[14,16,19,33,37],本研究区C₃与C₄植物混合生长,并且在海拔3 500~4 000 m内分布着较高比例的C₄植物(表1和图2)。结合C₃与C₄植物比例的变化,发现随海拔升高,C₄植物比例不断减少,地上植被光合类型逐渐由C₃植物主导(表1)。李嘉竹等^[31]通过分析贡嘎山东坡地表植被、土壤有机质的 $\delta^{13}\text{C}$ 发现土壤 $\delta^{13}\text{C}$ 随海拔的变化与C₃植物、C₄植物的分布有关,指出C₄植物仅生长于某一特定海拔范围内,相比于C₄植物,C₃植物占据了更高海拔的生境。郭正堂等^[3]在玉龙山东麓发现随海拔的升高,C₃植物逐渐取代C₄植物,由于C₃植物的同位素组成相对C₄植物的偏负,致使碳同位素值随海拔的升高偏负,并指出温度和湿度是导致土壤 $\delta^{13}\text{C}$ 值随海拔更偏负的主要原因。

青藏高原表土 $\delta^{13}\text{C}$ 值随海拔的变化趋势取决于温度、降水及大气压等因素间的相互竞争^[10,14,19,30-33]。温度影响植物碳同位素分馏,同时也是影响土壤微生物活性以及土壤有机质分解的重

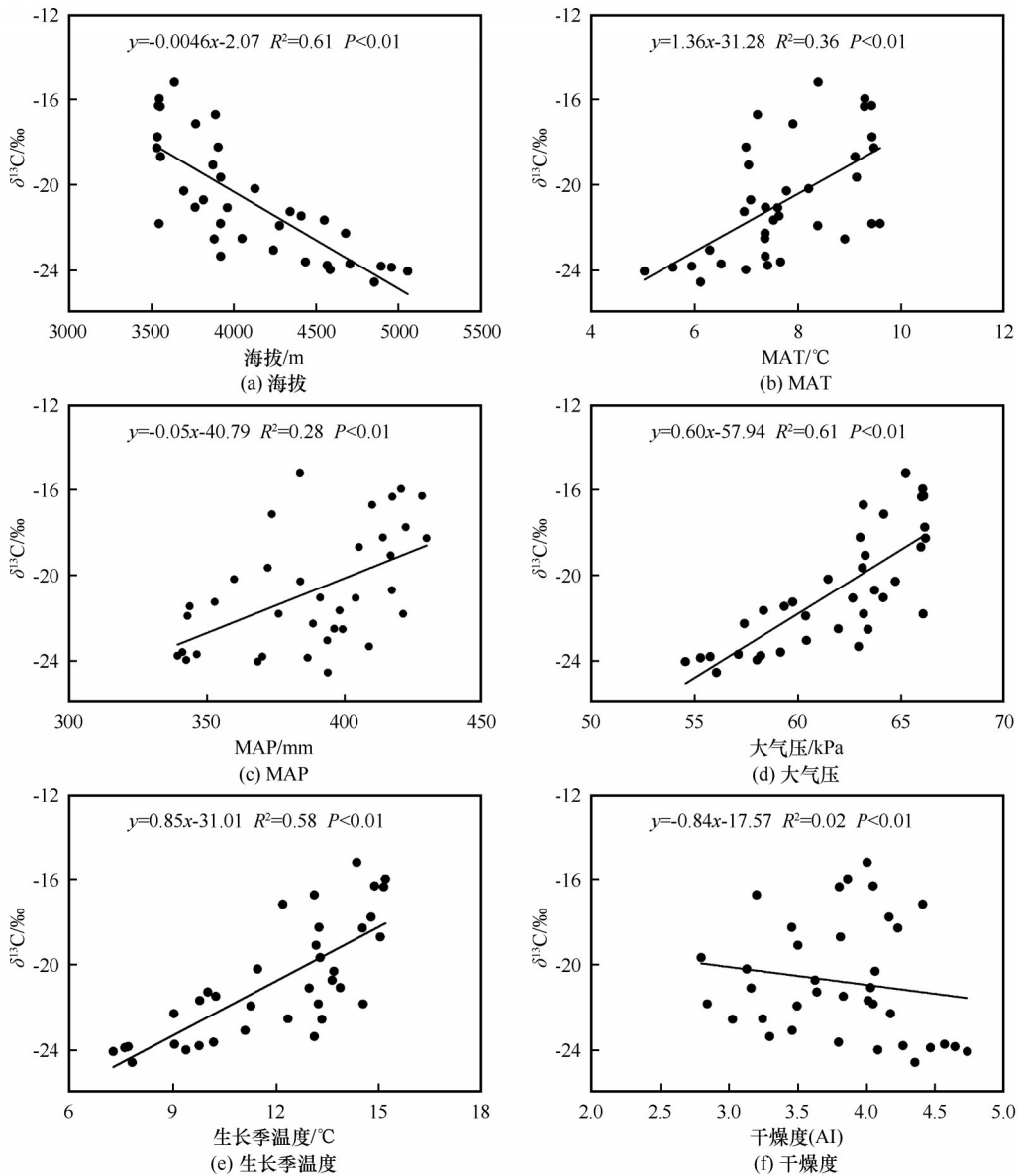


图3 雅江中上游地区表土 $\delta^{13}\text{C}$ 与海拔、MAT、MAP、大气压、生长季温度及干燥度的关系

Fig. 3 Relationship between surface soil $\delta^{13}\text{C}$ and altitude, MAT, MAP, atmospheric pressure, growing season temperature and aridity index in the upper and middle reaches of the Yarlung Zangbo River

要因子, 现有研究表明低温限制土壤有机质的分解以及土壤呼吸^[53], 并且随着温度的降低, C_4 植物比例减少、 C_3 植物比例增加, 其次来源于 C_4 植物的土壤有机碳库分解速率更快^[27,54], 因此, 温度与土壤 $\delta^{13}\text{C}$ 理论上应存在正相关关系。本研究也发现, 表土 $\delta^{13}\text{C}$ 与MAT之间呈正相关 $[R^2=0.36, P<0.01]$, 图3(b)], MAT每升高1 °C, 表土 $\delta^{13}\text{C}$ 偏正1.4‰。这归因于随着海拔升高, 温度降低[图4(a)], 植物光合作用酶的活性减弱, 光合速率和 CO_2 同化速度都减小, 叶片内细胞间隙中的 CO_2 分压(P_i)升高, 从而引起碳同位素分馏程度增强, 植物的 $\delta^{13}\text{C}$ 减小^[12,30,33]。另一方面, 由于温度降低导致土壤水分

蒸发减弱, 造成土壤中可利用水分增大, 植物的 $\delta^{13}\text{C}$ 减小^[31], 同时过低的温度也使得土壤有机质的分解受限。温度对同位素的影响与饱和蒸气压亏缺和大气湿度也有关, 随着海拔的升高, 温度和大气压综合影响使得大气湿度增加, 饱和蒸气压亏缺减小, 植物叶片气孔导度增大, 导致 $\delta^{13}\text{C}$ 减小^[31,55]。另外, 我们发现表土 $\delta^{13}\text{C}$ 与生长季温度显著正相关 $[R^2=0.58, P<0.01]$, 图3(e)], 生长季温度每升高1 °C, 表土 $\delta^{13}\text{C}$ 偏正0.85‰, 这进一步表明生长季温度可能是影响该区域表土 $\delta^{13}\text{C}$ 变化的主要气候因子。值得注意的是, 对比其他研究^[10,14,27,30,33], 本研究中表土 $\delta^{13}\text{C}$ 随海拔及温度变化的斜率均较大, 推测这主

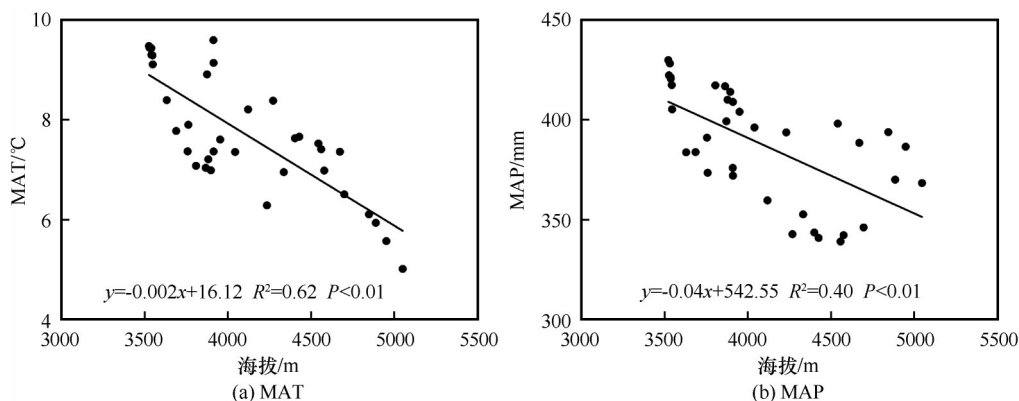


图4 雅江中上游地区各采样点海拔与MAT和MAP间的关系

Fig. 4 Relationship between altitude and MAT and MAP of sampling points in the upper and middle reaches of the Yarlung Zangbo River

要是不同于其他区域地上植被受 C_3 植物主导,该研究区域生长的 C_4 植物比例较高,导致表土 $\delta^{13}C$ 偏正,在后续利用沉积物 $\delta^{13}C$ 重建古环境时可能需要避开 C_4 植物的影响。

降水被认为是影响 C_3 和 C_4 植物相对丰度的一个主要因素^[10,21-22,30,33]。已有大量研究表明 C_3 植物的 $\delta^{13}C$ 与降水呈负相关关系^[18,31,53,56-57]。这是由于当降水减少或者土壤湿度降低时,水分胁迫加重,植物为了减少水分蒸发,就会关闭气孔,降低气孔导度,使植物体内的 CO_2 浓度下降,叶片内外的 CO_2 浓度比降低,进而导致 $\delta^{13}C$ 升高^[12,53]。然而,本研究区表土 $\delta^{13}C$ 与年降水量呈正相关性 $[R^2=0.28, P<0.01]$,图3(c)]。不同于前人以 C_3 植物为主导的研究,这种正相关关系可能与该区域 C_4 植物比例高有关,因为 C_4 和 C_3 植物不同的光合机制造成对降水的响应不一致,Rao等^[10]已证实全球尺度 C_4 植物与降水呈正相关。另一方面,李嘉竹^[31]和Guo等^[58]分别在贡嘎山东坡海拔2000 m以上及西藏南北部发现植物 $\delta^{13}C$ 与降水量呈显著正相关,他们认为这是由降水量与海拔或者降水量与温度之间的负相关所导致的一种统计学相关,并无实际意义。尽管雅江中上游地区海拔与MAT[图4(a)]和MAP[图4(b)]间的相关性分析表明两两均呈显著负相关,但通过分析干燥度(可以更确切反映地区水分干湿状况)对表土 $\delta^{13}C$ 的影响,二者间几乎没有相关性 $[R^2=0.01, P<0.01]$,图3(f)],因此,我们认为水分可能不是本研究区域表土 $\delta^{13}C$ 的限制因素。

CO_2 分压可以通过大气压乘以常数($335 \mu mol \cdot mol^{-1}$)获得,随着海拔升高,大气压降低, CO_2 分压也相应降低,植物可利用的 CO_2 浓度降低。Farquhar

等^[12]提出了经典 C_3 植物的碳同位素分馏模型: $\delta^{13}C = \delta^{13}C_a - a - (b-a) \times (P_i/P_a)$ ($\delta^{13}C_a$ 是大气 CO_2 的同位素组成; a 为从大气进入植物的 CO_2 碳同位素分馏值(约为4.4‰); b 为羧基化同位素分馏值(27‰~30‰); P_i 是叶片细胞间隙内 CO_2 的分压; P_a 是大气中 CO_2 的分压),即大气压与 $\delta^{13}C$ 呈负相关,并且这种负相关性已被证实^[14,59]。然而,本研究发现雅江中上游地区表土 $\delta^{13}C$ 值与该区域大气压呈显著正相关[图3(D)],用分馏模型无法解释这种相关性。Zhao等^[33]在青藏高原东北部石羊河地区也发现了类似的规律,认为 CO_2 分压仅在统计学上与表土 $\delta^{13}C$ 值相关,并不是影响该区域 $\delta^{13}C$ 值变化的主要因素。尽管Morecroft等^[52]通过控制实验发现大气压与植物 $\delta^{13}C$ 正相关,并且有学者认为大气压降低反而会增加植物的气孔密度和气体扩散能力, $\delta^{13}C$ 值降低,但目前关于大气压的影响依然没有明确的定论。此外,Wang等^[60]发现 $\delta^{13}C_a$ 随海拔变化的梯度仅为 $0.06‰ \cdot km^{-1}$,而本研究中表土 $\delta^{13}C$ 随海拔变化的梯度是 $5.0‰ \cdot km^{-1}$,远大于 $\delta^{13}C_a$ 的变化程度。综合而言, CO_2 分压的变化不是影响本研究区表土 $\delta^{13}C$ 差异的主要原因。

4 结论

通过分析雅江中上游地区表土样品的 $\delta^{13}C$,主要得出以下结论:

(1)雅江中上游地区表土 $\delta^{13}C$ 主要分布在 $-24.6‰ \sim -15.2‰$ 范围之间,平均值为 $-20.8‰$, C_4/C_3 植物比例的变化主导了该区域表土 $\delta^{13}C$ 的组成差异。

(2)雅江中上游地区表土 $\delta^{13}C$ 与海拔呈显著负

相关($P < 0.01$), 海拔每升高 100 m, 表土 $\delta^{13}\text{C}$ 偏负 0.5‰。年平均气温和生长季温度与表土 $\delta^{13}\text{C}$ 呈正相关($P < 0.01$), 揭示温度(尤其是生长季温度)可能是影响该区域表土 $\delta^{13}\text{C}$ 随海拔变化的主要原因, 而降水和 CO_2 分压不是主要限制因素。

参考文献(References):

- [1] Cerling T E, Quade J, Wang Y, et al. Carbon isotopes in soils and palaeosols as ecology and palaeoecology indicators[J]. *Nature*, 1989, 341(6238): 138-139.
- [2] O'Leary M H. Carbon isotopes in photosynthesis[J]. *BioScience*, 1988, 38(5): 328-336.
- [3] Guo Zhengtang, Wu Haibin, Wei Jianjing, et al. Tentative estimate of the southeast margin uplift of Qinghai-Xizang Plateau using organic carbon isotope composition of paleosols[J]. *Quaternary Sciences*, 2001, 21(5): 392-398. [郭正堂, 吴海斌, 魏建晶, 等. 用古土壤有机质碳同位素探讨青藏高原东南缘的隆升幅度[J]. 第四纪研究, 2001, 21(5): 392-398.]
- [4] Rao Zhiguo, Guo Wenkang, Xue Qian, et al. Assessment on primary provenance of organic matter in loess/paleosol sequences in the western Chinese loess plateau: local biomass or bedrocks in dust source regions[J]. *Quaternary Sciences*, 2015, 35(4): 819-827. [饶志国, 郭文康, 薛骞, 等. 黄土高原西部地区黄土地层有机质主要来源分析[J]. 第四纪研究, 2015, 35(4): 819-827.]
- [5] Ning Youfeng, Liu Weiguo, An Zhisheng. Carbon isotopic variation of the organic matter during the plant-soil transformation[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 2005, 26(Suppl 1): 236. [宁有丰, 刘卫国, 安芷生. 植物-土壤有机质转化过程中的碳同位素组成变化[J]. 地球学报, 2005, 26(增刊1): 236.]
- [6] Wang Guoan. Application of stable carbon isotope for paleoenvironmental research[J]. *Quaternary Sciences*, 2003, 23(5): 471-484. [王国安. 稳定碳同位素在第四纪古环境研究中的应用[J]. 第四纪研究, 2003, 23(5): 471-484.]
- [7] Kohn M J. Carbon isotope compositions of terrestrial C_3 plants as indicators of (paleo)ecology and (paleo)climate[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2010, 107(46): 19691-19695.
- [8] Rao Zhiguo, Chen Fahu, Cao Jie, et al. Variation of soil organic carbon isotope and C_3/C_4 vegetation type transition in the western Loess Plateau during the Last Glacial and Holocene periods[J]. *Quaternary Sciences*, 2005, 25(1): 107-114. [饶志国, 陈发虎, 曹洁, 等. 黄土高原西部地区末次冰期和全新世有机碳同位素变化与 C_3/C_4 植被类型转换研究[J]. 第四纪研究, 2005, 25(1): 107-114.]
- [9] Liu Weiguo, Ning Youfeng, An Zhisheng, et al. The response of organic carbon isotopes to vegetation in modern soil and paleosol on the Chinese Loess Plateau[J]. *Science in China (Series D: Earth Sciences)*, 2002, 32(10): 830-836. [刘卫国, 宁有丰, 安芷生, 等. 黄土高原现代土壤和古土壤有机碳同位素对植被的响应[J]. 中国科学(D辑: 地球科学), 2002, 32(10): 830-836.]
- [10] Rao Zhiguo, Guo Wenkang, Cao Jiantao, et al. Relationship between the stable carbon isotopic composition of modern plants and surface soils and climate: a global review[J]. *Earth-Science Reviews*, 2017, 165: 110-119.
- [11] Gu Zhaoyan, Liu Qiang, Xu Bing, et al. Climate change control on the relative abundance of C_3/C_4 plants since the Last Glacial Maximum on the Loess Plateau[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2003, 48(13): 1458-1464. [顾兆炎, 刘强, 许冰, 等. 气候变化对黄土高原末次盛冰期以来的 C_3/C_4 植物相对丰度的控制[J]. 科学通报, 2003, 48(13): 1458-1464.]
- [12] Farquhar G D, Ehleringer J R, Hubick K T. Carbon isotope discrimination and photosynthesis[J]. *Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology*, 1989, 40: 503-537.
- [13] Körner C, Farquhar G D, Wong S C. Carbon isotope discrimination by plants follows latitudinal and altitudinal trends[J]. *Oecologia*, 1991, 88(1): 30-40.
- [14] Li Mingcai, Liu Hongyan, Li Laixing, et al. Carbon isotope composition of plants along altitudinal gradient and its relationship to environmental factors on the Qinghai-Tibet Plateau[J]. *Polish Journal of Ecology*, 2007, 55: 67-78.
- [15] Ma Jianying, Sun Wei, Zhang Huiwen, et al. Stable carbon isotope characteristics of different plant species and surface soil in arid regions[J]. *Frontiers of Earth Science in China*, 2009, 3(1): 107-111.
- [16] Li Xiangbo, Chen Jianfa, Zhang Pingzhong. The characteristics of carbon isotope composition of modern plants over Qinghai-Tibet Plateau (NE) and its climatic information[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 1999, 17(2): 325-329. [李相博, 陈践发, 张平中. 青藏高原(东北部)现代植物碳同位素组成特征及其气候信息[J]. 沉积学报, 1999, 17(2): 325-329.]
- [17] Wang Guoan, Han Jiamao, Zhou Liping. The annual average temperature in Northern China[J]. *Chinese Geology*, 2002, 29(1): 55-57. [王国安, 韩家懋, 周力平. 中国北方 C_3 植物碳同位素组成与年均温度关系[J]. 中国地质, 2002, 29(1): 55-57.]
- [18] Zhang Bo, Ning Youfeng, An Zhisheng, et al. Abundance of C_4/C_3 plants in the Chinese loess plateau and their response to plant growing environment[J]. *Quaternary Sciences*, 2015, 35(4): 801-808. [张博, 宁有丰, 安芷生, 等. 黄土高原现代 C_4 和 C_3 植物生物量及其对环境的响应[J]. 第四纪研究, 2015, 35(4): 801-808.]
- [19] Qi Lin. Distribution of organic carbon isotope composition for modern soils from the eastern margin of the Tibetan Plateau and its main controlling factors[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2017. [綦琳. 青藏高原东缘表土有机碳同位素分布特征及其主控因素研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2017.]
- [20] Rao Zhiguo, Chen Fahu, Cheng Hai, et al. High-resolution summer precipitation variations in the western Chinese Loess Plateau during the last glacial[J]. *Scientific Reports*, 2013, 3: 2785.
- [21] Wang Qiang, Wang Xin, Wei Haitao, et al. Climatic significance of the stable carbon isotopic composition of surface soils in northern Iran and its application to an Early Pleistocene loess section[J]. *Organic Geochemistry*, 2019, 127: 104-114.
- [22] Xie Haichao, Zhang Huiwen, Ma Jianying, et al. Trend of increasing Holocene summer precipitation in arid central Asia: evidence from an organic carbon isotopic record from the LJW10 loess section in Xinjiang, NW China[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2018, 509: 24-32.
- [23] Chen Yingyong, Lu Huayu, Zhang Enlou, et al. Test stable carbon isotopic composition of soil organic matters as a proxy indicator of past precipitation: study of the sand fields in Northern China[J]. *Quaternary International*, 2015, 372: 79-86.
- [24] Lee Xinqing, Feng Zhaodong, Guo Lanlan, et al. Carbon isotope of bulk organic matter: a proxy for precipitation in the arid and semiarid central East Asia[J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2005, 19(4): 1-8.

- [25] Yang Shengli, Liu Li, Chen Hui, et al. Variability and environmental significance of organic carbon isotopes in Ganzi loess since the last interglacial on the eastern Tibetan Plateau[J]. *Catena*, 2021, 196: 104866.
- [26] Stevenson B A, Kelly E F, McDonald E V, et al. The stable carbon isotope composition of soil organic carbon and pedogenic carbonates along a bioclimatic gradient in the Palouse region, Washington State, USA [J]. *Geoderma*, 2005, 124 (1/2): 37-47.
- [27] Wang Shaoqiang, Fan Jiangwen, Song Minghua, et al. Patterns of SOC and soil $\delta^{13}\text{C}$ and their relations to climatic factors and soil characteristics on the Qinghai-Tibetan Plateau [J]. *Plant and Soil*, 2013, 363(1/2): 243-255.
- [28] Wang Guoan, Li Jiazhu, Liu Xianzhao, et al. Variations in carbon isotope ratios of plants across a temperature gradient along the 400 mm isohet of mean annual precipitation in North China and their relevance to paleovegetation reconstruction[J]. *Quaternary Science Reviews*, 2013, 63: 83-90.
- [29] Lu Yudong, Sun Jianzhong, Li Tonglu, et al. Application of carbon isotope in Chinese loess to semi-quantitative estimation of palaeotemperature[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2005, 25(3): 139-143. [卢玉东, 孙建中, 李同录, 等. 利用黄土中的碳同位素半定量地重建古温度[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2005, 25(3): 139-143.]
- [30] Zhang Dongliang, Yang Yunpeng, Ran Min. Variations of surface soil $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ in the different climatic regions of China and paleoclimatic implication [J]. *Quaternary International*, 2020, 536: 92-102.
- [31] Li Jiazhu, Wang Guo'an, Liu Xianzhao, et al. Variations in carbon isotope ratios of C_3 plants and distribution of C_4 plants along an altitudinal transect on the eastern slope of Mount Gongga[J]. *Science in China (Series D: Earth Sciences)*, 2009, 39(10): 1387-1396. [李嘉竹, 王国安, 刘贤赵, 等. 贡嘎山东坡 C_3 植物碳同位素组成及 C_4 植物分布沿海拔高度的变化[J]. *中国科学(D辑: 地球科学)*, 2009, 39(10): 1387-1396.]
- [32] Lü Houyuan, Gu Zhaoyan, Wu Naiqin, et al. Effect of altitude on the organic carbon-isotope composition of modern surface soils from Qinghai-Xizang Plateau [J]. *Quaternary Sciences*, 2001, 21(5): 399-406. [吕厚远, 顾兆炎, 吴乃琴, 等. 海拔高度的变化对青藏高原表土 $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 的影响[J]. *第四纪研究*, 2001, 21(5): 399-406.]
- [33] Zhao Yan, Wu Fuli, Fang Xiaomin, et al. Altitudinal variations in the bulk organic carbon isotopic composition of topsoil in the Qilian Mountains area, NE Tibetan Plateau, and its environmental significance [J]. *Quaternary International*, 2017, 454: 45-55.
- [34] Lü Houyuan, Wu Naiqin, Gu Zhaoyan, et al. Distribution of carbon isotope composition of modern soils on the Qinghai-Tibetan Plateau[J]. *Biogeochemistry*, 2004, 70(2): 275-299.
- [35] Lajtha K, Getz J. Photosynthesis and water-use efficiency in pinyon-juniper communities along an elevation gradient in northern New Mexico[J]. *Oecologia*, 1993, 94(1): 95-101.
- [36] 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.
- [37] Wei Kai, Jia Guodong. Soiln-alkane $\delta^{13}\text{C}$ along a mountain slope as an integrator of altitude effect on plant species $\delta^{13}\text{C}$ [J]. *Geophysical Research Letters*, 2009, 36(11): L11401.
- [38] Hou Juzhi, D'Andrea W J, Wang Mingda, et al. Influence of the Indian monsoon and the subtropical jet on climate change on the Tibetan Plateau since the late Pleistocene [J]. *Quaternary Science Reviews*, 2017, 163: 84-94.
- [39] Liu Hui, Li Xiaoying, Xiao Jianhua, et al. Variations of wind erosion climatic erosivity in the Yarlung Zangbo River basin during 1961—2015[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2019, 39(4): 688-695. [刘慧, 李晓英, 肖建华, 等. 1961—2015年雅鲁藏布江流域风蚀气候侵蚀力变化[J]. *地理科学*, 2019, 39(4): 688-695.]
- [40] Li Hui, Wen Xuemei, Yu Shunli. Investigation and evaluation on germplasm resources of vascular plants distributed in Qiangtang Plateau and upper area of Yarlungzangbo River [J]. *Plant Diversity and Resources*, 2013, 35(3): 327-334. [李晖, 文雪梅, 于顺利. 羌塘高原及雅鲁藏布江上游地区植物种质资源调查与评价[J]. *植物分类与资源学报*, 2013, 35(3): 327-334.]
- [41] Zhao Jian, Li Rong. Soil erosion and subarea characteristics in Yarlung Tsangpo River Basin [J]. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 2008, 25(3): 42-45. [赵健, 李蓉. 雅鲁藏布江流域土壤侵蚀区域特征初步研究[J]. *长江科学院院报*, 2008, 25(3): 42-45.]
- [42] Ding Mingjun. Grid data of annual temperature and annual precipitation on the Tibetan Plateau and its surrounding areas during 1998—2017 [DS]. National Tibetan Plateau Data Center, 2019. DOI: 10.11888/Meteoro. tpcd. 270239. CSTR: 18046. 11. Meteoro. tpcd. 270239. [丁明军. 青藏高原及周边地区气温和降水格点数据(1998—2017) [DB/OL]. 国家青藏高原科学数据中心, 2019. DOI: 10.11888/Meteoro. tpcd. 270239. CSTR: 18046. 11. Meteoro. tpcd. 270239.]
- [43] Trabucco A, Zomer R J. Global aridity index and potential evapotranspiration (ET0) climate database v2[J]. *CGIAR Consortium Spat Inf*, 2018, 10: m9.
- [44] Hamlyn G J. *Plants and microclimate* [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1983.
- [45] Wang Luo, Lü Houyuan, Wu Naiqin, et al. Altitudinal trends of stable carbon isotope composition for *Poaceae* in Qinghai-Xizang Plateau [J]. *Quaternary Sciences*, 2003, 23 (5): 573-580. [旺罗, 吕厚远, 吴乃琴, 等. 青藏高原现代禾本科植物的 $\delta^{13}\text{C}$ 与海拔高度的关系[J]. *第四纪研究*, 2003, 23(5): 573-580.]
- [46] Wang Luo, Lü Houyuan, Wu Naiqin, et al. Discovery of C_4 species at high altitude in Qinghai-Tibetan Plateau [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2004, 49(13): 1392-1396.
- [47] Zhang Lele, Gao Liming, Zhao Lin, et al. Spatial and temporal characteristics of global solar radiation over Qinghai-Tibetan Plateau based on ITPCAS dataset [J]. *Acta Energetica Solaris Sinica*, 2019, 40(9): 2521-2529. [张乐乐, 高黎明, 赵林, 等. 基于 ITPCAS 数据的青藏高原太阳总辐射时空变化特征[J]. *太阳能学报*, 2019, 40(9): 2521-2529.]
- [48] Sage R F, Sage T L. Microsite characteristics of *Muhlenbergia richardsonis* (Trin.) Rydb., an alpine C_4 grass from the White Mountains, California [J]. *Oecologia*, 2002, 132 (4): 501-508.
- [49] Ehleringer J R, Cerling T E, Helliker B R. C_4 photosynthesis, atmospheric CO_2 and climate [J]. *Oecologia*, 1997, 112(3): 285-299.
- [50] *Delectis Florae Reipublicae Popularis Sinicae Agendae Academiae Sinicae Edita. Flora reipublicae popularis sinicae* [M]. Beijing: Science Press, 2004. [中国科学院中国植物志编辑委员会. 中国植物志. 第一卷: 总论[M]. 北京: 科学出版社, 2004.]

- [51] Lu Yaozeng. Draft of 《Soil classification of Tibet》[J]. Chinese Journal of Soil Science, 1982, 13(5): 1-4. [卢耀曾. 《西藏土壤分类》草案[J]. 土壤通报, 1982, 13(5): 1-4.]
- [52] 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.
- [53] Zhou Yongchun, Fan Jiangwen, Zhong Huaping, et al. Relationships between altitudinal gradient and plant carbon isotope composition of grassland communities on the Qinghai-Tibet Plateau, China[J]. Science in China (Series D: Earth Sciences), 2013, 43(1): 120-130. [周咏春, 樊江文, 钟华平, 等. 青藏高原草地群落植物碳同位素组成与海拔梯度的关系[J]. 中国科学(D辑: 地球科学), 2013, 43(1): 120-130.]
- [54] Cheng Xiaoli, Luo Yiqi, Xu Xia, et al. Soil organic matter dynamics in a North America tallgrass prairie after 9 yr of experimental warming[J]. Biogeosciences, 2011, 8(6): 1487-1498.
- [55] Wynn J G, Bird M I. Environmental controls on the stable carbon isotopic composition of soil organic carbon: implications for modelling the distribution of C_3 and C_4 plants, Australia [J]. Tellus B: Chemical and Physical Meteorology, 2008, 60 (4): 604-621.
- [56] 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.
- [57] Schulze E D, Turner N C, 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.
- [58] Guo Guangmeng, Xie Gaodi. The relationship between plant stable carbon isotope composition, precipitation and satellite data, Tibet Plateau, China [J]. Quaternary International, 2006, 144(1): 68-71.
- [59] Qiang Weiya, Wang Xunling, Chen Tuo, et al. Variations of stomatal density and carbon isotope values of *Picea crassifolia* at different altitudes in the Qilian Mountains [J]. Trees, 2003, 17(3): 258-262.
- [60] Wang Guoan, Han Jiamao, Faiia A, et al. Experimental measurements of leaf carbon isotope discrimination and gas exchange in the progenies of *Plantago depressa* and *Setaria viridis* collected from a wide altitudinal range [J]. Physiologia Plantarum, 2008, 134(1): 64-73.

A preliminary study on the variation of stable carbon isotope in surface soil and its influencing factors in the upper and middle reaches of Yarlung Zangbo River

WANG Shuyuan¹, FAN Yijiao¹, YANG Junhuai¹, CHEN Zixuan¹, TIAN Weidong¹,
GAO Fuyuan², XIA Dunsheng¹

(1. Key Laboratory of Western China's Environmental Systems (Ministry of Education), College of Earth and Environmental Sciences, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China; 2. College of Urban Environment, Lanzhou City University, Lanzhou 730070, China)

Abstract: The environmental information recorded by the stable carbon isotope compositions of soil organic matter ($\delta^{13}\text{C}$) is crucial to the study of climate change, but the mechanism by which the soil $\delta^{13}\text{C}$ responds to climate change at high altitude remains unclear. A systematically analysis on the $\delta^{13}\text{C}$ of 36 surface soil samples in the upper and middle reaches of the Yarlung Zangbo River, southern Qinghai-Tibet Plateau (altitude between 3 500 and 5 100 m) was carried out, and the responses of $\delta^{13}\text{C}$ to climatic factors were discussed. Results showed that the $\delta^{13}\text{C}$ values ranged from -24.6‰ to -15.2‰ , with an average value of -20.8‰ , indicating that the aboveground vegetation is C_3/C_4 vegetation type. With the increase of altitude, the proportion of C_4 plants decreased but C_3 plants increased, which dominated the difference of $\delta^{13}\text{C}$ composition. when the altitude increased by 100 m, the $\delta^{13}\text{C}$ became lighter by 0.5‰ . Further analysis suggested the growing season temperature may be the main climatic factor affecting the variation of $\delta^{13}\text{C}$, and the contribution of precipitation and atmospheric pressure were lower.

Key words: stable carbon isotope composition; temperature; precipitation; surface soil; Yarlung Zangbo River

(责任编辑: 杨燕)