

中国百种杰出学术期刊
中国精品科技期刊
中国科协优秀期刊
中国科学院优秀科技期刊
新中国 60 年有影响力的期刊
国家期刊奖

ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

生态学报

Acta Ecologica Sinica

(Shengtai Xuebao)

第 31 卷 第 1 期
Vol.31 No.1
2011



中国生态学学会
中国科学院生态环境研究中心
科学出版社

主办
出版



中国科学院科学出版基金资助出版

生态学报

(SHENGTAI XUEBAO)

第 31 卷 第 1 期 2011 年 1 月 (半月刊)

目 次

青藏高原东缘林线杜鹃-岷江冷杉原始林的空间格局	缪 宁, 刘世荣, 史作民, 等 (1)
季风常绿阔叶林不同恢复阶段藤本植物的物种多样性比较	李帅锋, 苏建荣, 刘万德, 等 (10)
越冬和复苏时期太湖水体蓝藻群落结构的时空变化	顾婷婷, 孔繁翔, 谭 啸, 等 (21)
海南新村湾海草床主要鱼类及大型无脊椎动物的食源	樊敏玲, 黄小平, 张大文, 等 (31)
广西涠洲岛造礁珊瑚种群结构的空间分布	梁 文, 张春华, 叶祖超, 等 (39)
宽窄行栽植模式下三倍体毛白杨根系分布特征及其与根系吸水的关系	席本野, 王 烨, 贾黎明, 等 (47)
干旱河谷-山地森林交错带土壤水分与养分特征	刘 彬, 罗承德, 张 健, 等 (58)
信号分子水杨酸减缓干旱胁迫对紫御谷光合和膜脂过氧化的副效应	易小林, 杨丙贤, 宗学凤, 等 (67)
UV-B 辐射对南方红豆杉生活史型和紫杉烷类含量的影响	于景华, 李德文, 庞海河, 等 (75)
模拟氮沉降对石栎和苦槠幼苗土壤呼吸的影响	李 凯, 江 洪, 由美娜, 等 (82)
环渤海湾地区连作苹果园土壤中酚酸类物质变化	孙海兵, 毛志泉, 朱树华 (90)
不同施肥方法对马来沉香和土沉香苗期根系生长的影响	王 冉, 李吉跃, 张方秋, 等 (98)
秋华柳和枫杨幼苗对镉的积累和耐受性	贾中民, 魏 虹, 孙晓灿, 等 (107)
祁连山北坡退化林地植被群落的自然恢复过程及土壤特征变化	赵成章, 石福习, 董小刚, 等 (115)
中国北方农牧交错带 C3 草本植物 $\delta^{13}\text{C}$ 与温度的关系及其对水分利用效率的指示	刘贤赵, 王国安, 李嘉竹, 等 (123)
不同退耕模式细根(草根)分解过程中 C 动态及土壤活性有机碳的变化	荣 丽, 李守剑, 李贤伟, 等 (137)
黑龙江省完达山东部林区东北虎猎物生物量	周绍春, 张明海, 孙海义 (145)
生态保护项目对大熊猫栖息地的影响	张玉波, 王梦君, 李俊清 (154)
石灰和 EM 处理条件下土壤动物群落在落叶分解中的变化	高梅香, 张雪萍 (164)
基于 EPG 的麦长管蚜、麦二叉蚜和禾谷缢管蚜取食行为比较	苗 进, 武予清, 郁振兴, 等 (175)
对映-贝壳杉烷型二萜类化合物对土壤纤毛虫群落的毒性效应	宁应之, 杜海峰, 王红军 (183)
红脂大小蠹种群空间格局地统计学分析及抽样技术	潘 杰, 王 涛, 宗世祥, 等 (195)
山西不同生态型大豆种质资源蛋白亚基的变异	王燕平, 李贵全, 郭数进, 等 (203)
施肥和覆膜垄沟种植对旱地小麦产量及水氮利用的影响	李廷亮, 谢英荷, 任苗苗, 等 (212)
近 40a 甘肃省气候生产潜力时空变化特征	罗永忠, 成自勇, 郭小芹 (221)
基于 GIS 的农村住区生态重要性空间评价及其分区管制——以兴国县长冈乡为例	谢花林, 李秀彬 (230)
农户收入差异对生活用能及生态环境的影响——以江汉平原为例	杨 振 (239)
河北省耕地生态经济系统能值指标空间分布差异及其动因	王 千, 金晓斌, 周寅康, 等 (247)
土地利用对石漠化地区土壤团聚体有机碳分布及保护的影响	罗友进, 魏朝富, 李 渝, 等 (257)
专论与综述	
景观格局-土壤侵蚀研究中景观指数的意义解释及局限性	刘 宇, 吕一河, 傅伯杰 (267)
美国煤矿废弃地的生态修复	张成梁, B. Larry Li (276)
农田土壤食物网管理的原理与方法	陈云峰, 胡 诚, 李双来, 等 (286)
学术信息与动态	
旱地、荒漠和荒漠化: 探寻恢复之路 —— 第三届国际荒漠化会议述评	吕一河, 傅伯杰 (293)

中国北方农牧交错带 C₃ 草本植物 $\delta^{13}\text{C}$ 与温度的关系及其对水分利用效率的指示

刘贤赵^{1,*}, 王国安², 李嘉竹³, 王文文¹, 赵丽丽¹, 李宝江¹

(1. 鲁东大学地理与规划学院, 山东 烟台 264025; 2. 中国农业大学资源与环境学院土壤-植物教育部重点实验室, 北京 100193;
3. 中国矿业大学化学与环境工程学院, 北京 100083)

摘要: 由于植物稳定碳同位素组成($\delta^{13}\text{C}$)综合反映了植物光合过程中 C、H₂O 交换的信息, 因而从理论上讲它可以作为植物长期水分利用效率的潜在指标, 并揭示与植物生理生态过程相联系的一系列气候环境信息。通过对中国北方农牧交错带 400 mm 等降水样带上 28 个科的 118 种 C₃ 草本植物叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值的测定, 探讨了 C₃ 草本植物 $\delta^{13}\text{C}$ 和水分利用效率(WUE)对环境温度梯度变化的响应以及气候环境因素对其产生的影响, 揭示了样带控制植物 $\delta^{13}\text{C}$ 变化的主要环境因子。结果显示: 在 400 mm 降水带上 C₃ 植物 $\delta^{13}\text{C}$ 分布区间为 -31.5‰ — -23.0‰ , 平均值为 -27.6‰ , 分布范围与黄土区干旱-半干旱区 C₃ 草本植物一致。整体 C₃ 植物 $\delta^{13}\text{C}$ 随年均温和夏季均温升高分别变重 $0.14\text{‰}/^{\circ}\text{C}$ 和 $0.27\text{‰}/^{\circ}\text{C}$, 指示植物 WUE 随大气温度升高而增加。但这仅是一种表象, 温度与植物碳同位素的这种关系实质上是温度升高导致的土壤相对湿度(或湿润指数)降低造成水分胁迫进而影响植物碳同位素分馏的结果, 植物可利用的有效水分是本样带植物碳同位素分馏的控制因子。5 种 C₃ 广适性植物 $\delta^{13}\text{C}$ 均随温度升高而变重, 但变化幅度不同, 而且它们之间平均 $\delta^{13}\text{C}$ 值有显著差异, 表明不同物种的水分利用状况对温度的响应不同, 说明不同物种有不同适应环境变化的策略。此外, 本结果还显示不同寿命的草本植物 $\delta^{13}\text{C}$ 值以及用碳同位素表征的 WUE 表现出多年生草本 > 2 年生草本 > 1 年生草本(可能与不同寿命草本植物的根系分布和吸水能力有关), 这与 Ehleringer 等在沙漠地区研究的结果一致, 而与湿润气候区的结果相反, 表明不同寿命的草本植物 $\delta^{13}\text{C}$ 值和 WUE 的变化可能与当地水分条件有关。

关键词: 北方农牧交错带; 碳同位素; 水分利用效率; 温度; 草本植物

Relationship between temperature and $\delta^{13}\text{C}$ values of C₃ herbaceous plants and its implications of WUE in farming-pastoral zone in North China

LIU Xianzhao^{1,*}, WANG Guoan², LI Jiazhui³, WANG Wenwen¹, ZHAO Lili¹, LI Baojiang¹

¹ College of Geography and Planning, Ludong University, Yantai 264025, China

² Key Laboratory of Plant-Soil Interactions, Ministry of Education, College of Resources and Environmental Sciences, China Agricultural University, Beijing 100193, China

³ School of Chemical and Environmental Engineering, China University of Mining and Technology, Beijing 100083, China

Abstract: Plant carbon isotope composition ($\delta^{13}\text{C}$) comprehensively reflects the information of C and H₂O exchange in the process of plant photosynthesis, thus, in theory it could serve as a potential indicator of long-term water use efficiency (WUE) of plants. In addition, it could also be used to reveal a series of climatic and environmental information related to plant physiology and ecology. In this paper, through the systematical measurements of $\delta^{13}\text{C}$ values of samples representing 28 families and 118 C₃ herb species along the isohyet of 400 mm in farming-pastoral zone in northern China, the responses of $\delta^{13}\text{C}$ values and WUE for C₃ plants to temperature gradients were analyzed. This study shows that, along the isohyet of 400 mm, the $\delta^{13}\text{C}$ values of C₃ plant species in farming-pastoral zone range between -31.5‰ and -23.0‰ , with an average value of -27.7‰ . The distribution range of plant $\delta^{13}\text{C}$ values in this study is consistent with that of C₃ plants

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(40673017); 烟台市科技攻关项目(2010163)

收稿日期: 2010-01-28; **修订日期:** 2010-08-09

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: xianzhaoliu@sina.com

grown in arid and semi-arid area on the Loess Plateau obtained by previous study. Statistical analyses for the whole C_3 plants show that the $\delta^{13}C$ values of C_3 plants and the mean annual temperature were significantly and positively correlated with an increase in $\delta^{13}C$ of about 0.14 ‰ per 1.0°C increase, and that the $\delta^{13}C$ values of C_3 plants also significantly and positively relate to the summer temperature, with a increasing rate of 0.27‰ per 1.0°C increase. The results indicate that plant WUE increases with rising air temperature. However, the phenomenon above is only a false appearance, the variations in $\delta^{13}C$ values of C_3 herbaceous plants with temperature are actually controlled by the water stress induced by the lower soil relative humidity (or humidity index) which is closely related to temperature increment. The available water for plant species growing in this belt transect is a controlling factor of *plant carbon isotope fractionation*. In addition, this study shows that the $\delta^{13}C$ values of 5 C_3 eurytopic plants also increase with increasing temperature, but both the slope variations and the average $\delta^{13}C$ values among species are significantly different, which suggests that different species have different strategies to adapt to environmental changes. Also, this study shows that, for different life-span herbaceous plant, $\delta^{13}C$ values and WUE denoted by carbon isotope ratio present the following patterns: the $\delta^{13}C$ of biennial herbs is smaller than that of perennial herbs, and larger than that of annual herbs (This could be associated with the root distribution and water absorption ability of different life-span herbs), and the finding is consistent with the results reported by Ehleringer in desert regimes, while opposite to the results from humid climate zone. This indicates that the $\delta^{13}C$ values and WUE of different life-span herbs are likely related to local moisture condition.

Key Words: Northern ecotone; carbon isotope; water-use efficiency; temperature; herbaceous plant

水分利用效率(WUE)是研究植物生理生态对全球环境变化响应以及预测全球变化影响的重要指标,也是干旱、半干旱地区估测植被生产力和制定水资源利用规划的重要参数^[1]。近百年来随着全球气候变暖进程的加剧,温度上升有可能破坏原有气候系统的能量平衡,使全球范围内热量和降水发生重新分配^[2],这种气候变化模式的改变将对敏感而脆弱的生态系统中植被的生长及其 WUE 带来巨大影响^[3]。植物 WUE 的高低取决于气孔控制的光合作用和蒸腾作用两个相互耦合的过程,弄清植物 WUE 对环境变化的响应特征和机制是理解生态系统碳、水循环及其耦合关系的基础。

植物组织的碳是在一段时间内积累起来的,其碳同位素($\delta^{13}C$)综合了植物内在生理和植物碳固定期间影响植物气体交换的外界环境信息^[4],因而可以有效地反映植物长期光合特性和新陈代谢,间接指示和估算植物这段时间内平均的 C_i/C_a (细胞间隙 CO_2 浓度和环境 CO_2 浓度之比)和 WUE^[5-7] 以及不同植物水分利用策略的比较^[8],并揭示与植物生理生态过程相联系的一系列气候环境特征。由于植物组织的 $\delta^{13}C$ 与 C_3 植物的 WUE 具有很强的正相关性^[5],从而使植物的 $\delta^{13}C$ 成为广泛用于研究各种陆生植物、植被 WUE 的有效工具。目前,从草本植物和木本植物、不同功能群植物以及山地垂直分布的植物,利用叶片 $\delta^{13}C$ 来指示植物长期内在水分利用效率(intrinsic water use efficiency,指植物叶片净光合速率与气孔导度之比,反映叶片碳吸收和水分耗散的内在调控情况)的研究较多^[7-12],但主要集中在植物 WUE($\delta^{13}C$)的空间差异与水分有效性的关系^[13-14]、植物 WUE($\delta^{13}C$)沿不同降水梯度样带或不同土壤水分状况区域的变化趋势^[15-20] 以及不同生活型植物 $\delta^{13}C$ 对季节或年均降雨量的响应关系等方面^[21-24],而对植物 WUE($\delta^{13}C$)随环境温度梯度变化的研究较少。尽管一些学者也一直在探索温度与植物碳同位素分馏的关系^[25-29],但除人工控制实验外^[27-29],多数研究仍是基于一定的海拔梯度探讨植物 $\delta^{13}C$ 对温度的响应^[30-37],因而很难排除其它环境因子(如降水因子)对植物 $\delta^{13}C$ (WUE)的干扰,以至于得到一些截然相反的结果^[31,38]。此外,多数研究都是以少数几个植物种或在小尺度范围内进行的^[32,35-37,39],并且涉及的植物主要是干旱或半干旱区的木本植物^[34,39-40],对生长在由半湿润区向半干旱过渡区的 C_3 草本植物报道较少。因此,温度与植物 $\delta^{13}C$ 之间的关系还需进一步证实。至于碳同位素技术在植物 WUE 研究中的应用,正如上文所说,已经在全球广泛开展,并被认为是一种估测植物长期 WUE 的可靠手段。虽然也有学者涉及北方农牧交错带植物的 WUE($\delta^{13}C$),但研究范围一般仅囿于农牧交错

带的一个典型地段,在中国北方农牧交错带这样一条长达数千公里的宏观带上,利用碳同位素技术研究 C₃ 草本植物 WUE 对环境温度梯度响应的报道迄今尚未见到。

中国北方农牧交错带是一个温度敏感的生态脆弱带,对气候变化具有明显的指示作用,加上全球变暖和人为活动等多种因素的综合影响,生态系统脆弱性表现典型,所以近年来北方农牧交错带成为全球多学科研究的热点和理想地带。本文的研究目的是:(i)通过对中国北方农牧交错带 C₃ 草本植物叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 组成特征的系统调查,了解植物 WUE 的种间差异以及水分利用策略;(ii)分析农牧交错带植被 $\delta^{13}\text{C}$ (WUE) 对温度变化的响应;(iii)讨论环境因子和生理过程对植被 WUE 的调控作用,为农牧交错带植被建设与恢复提供基础数据。

1 材料与方法

1.1 研究区自然概况及样带选取

北方农牧交错带(34°48'N—48°32' N, 103°15'E—124°37' E)位于中国内蒙古高原东南边缘和黄土高原北部,面积 $62.1 \times 10^4 \text{ km}^2$,人口约 7.0×10^7 。该区域为典型的温带半干旱大陆性季风气候,是半湿润区向半干旱区的过渡地带,干旱少雨,年平均温度 0—8 °C,年平均降水量 300—450 mm,年降水变率 15%—30%。自然植被自东向西由森林草原带过渡到典型草原带和荒漠草原带,是典型的干草原植被类型。土壤以栗钙土和棕壤为主。大多数地区海拔在 1000 m 以上,地貌复杂多样,以内蒙古高原为主体,草原、山地、沙地、河流和湖泊并存。由于北方农牧交错带是一个温度敏感带,在全球气候变暖的背景下,升温明显(如 1951—2000 年的 50a 间气温每 10a 升高 0.19 °C)。为便于探讨温度变化对植物 $\delta^{13}\text{C}$ (WUE) 的影响,选取北方农牧交错区 400 mm 等降水量线作为样带,该线自黑龙江漠河穿越蒙、吉、辽、冀、晋、陕、甘、宁等 9 省区,东西延伸约 1500 km,南北跨度约 1900 km,各样点间多年平均温度最小值与最大值相差 14.7 °C,明显的温度梯度为研究该区植物 $\delta^{13}\text{C}$ (WUE) 对温度变化的响应提供了天然条件。

1.2 样品采集与碳同位素测定

植物样品于 2008 年 8 月大致沿北方农牧交错带年降水 400 mm 等值线自东北向西南沿途进行采集(图 1),共采集了 28 个科的 118 种 C₃ 植物样品 239 个。采集的植物均为各样点的优势种或广适性植物,同一采样地点,所采集的同种植物数量不少于 5—7 株,每个植物种视叶片的多少分别从每株植物上采集相同数目的叶片进行混合,作为该植物种的一个样品。采样时,杂草类草本植物采集全部叶片,禾草类采集地上部分,所有样品均采自开阔、光照充足、远离村落的环境下,避免局部地貌等微环境的影响。各样点的地理位置、海拔高度、气候指标及主要土壤植被类型等信息列于表 1。

植物样品带回实验室用清水洗净、凉干于 105 °C 杀青后,置于 65 °C 的恒温干燥箱中烘 48h,随机选取 3—20 片来自不同个体的成熟叶片研磨粉碎,过 80 目筛,将称取好的样品 3—5 mg,封入真空燃烧管,并加入催化剂和氧化剂,在温度 1020 °C 下燃烧产生 CO₂。用元素分析仪(Flash EA1112)将其转化后在 Delta^{Plus} XP 质谱仪上测定植物碳同位素值,每个样品重复 3—5 次,测定误差为 $\pm 0.15\text{‰}$ 。碳同位素组成的表达式为

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

式中, $R_{\text{样品}}$ 和 $R_{\text{标准}}$ 分别表示测试样品和标准的碳同位素比值,碳同位素结果采用 PDB (Pee Dee Belemnite) 国际标准表示,实验分析在中国农业大学同位素地球化学实验室完成。

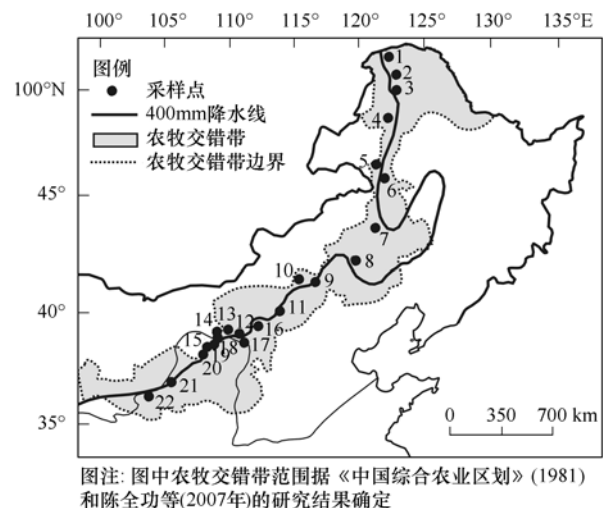


图1 研究区采样点分布

Fig. 1 Distribution map of sampling sites in the study area

表 1 采样点信息及各样点植物碳同位素平均值

Table 1 Information of sampling sites and the average values of plant $\delta^{13}\text{C}$ of each site

No.	SS	LO/(°)	LA/(°)	EV/m	MAT/°C	MAP/mm	ST	VT	HI	$\delta^{13}\text{C}/\text{‰}$	SA/个
1	漠河	122.52	52.97	433	-5.8	428	潜育土	寒温带针叶林	0.522	-29.1 ± 0.3	15
2	满归	122.01	52.02	649	-5.5	440	草甸土	寒温带针叶林	0.537	-28.7 ± 0.3	12
3	根河	121.31	50.46	718	-4.3	424	黑钙土	寒温带针叶林	0.480	-28.6 ± 0.3	9
4	牙克石	120.44	49.16	676	-2.9	379	黑钙土	寒温带针叶林	0.450	-28.2 ± 0.2	16
5	阿尔山	119.93	47.17	997	-2.7	392	灰黑土	温带典型草原	0.430	-28.0 ± 0.3	10
6	乌兰浩特	122.03	46.05	287	4.1	416	潮土	温带草甸草原	0.385	-27.8 ± 0.2	12
7	扎鲁特旗	120.90	44.57	265	2.8	388	栗钙土	温带草甸草原	0.359	-28.8 ± 0.2	11
8	巴林左旗	119.40	43.98	486	5.3	390	栗钙土	温带典型草原	0.361	-27.5 ± 0.2	12
9	多伦	116.47	42.18	1245	2.4	407	栗钙土	温带草甸草原	0.377	-28.4 ± 0.2	13
10	正镶白旗	115.12	42.24	1405	1.5	363	栗钙土	温带典型草原	0.430	-27.5 ± 0.2	10
11	丰镇	113.45	40.26	1195	4.7	413	黑垆土	温带草甸草原	0.382	-27.9 ± 0.2	10
12	准格尔旗	110.26	39.03	1249	7.5	400	黄绵土	温带草甸草原	0.370	-26.6 ± 0.3	9
13	鄂尔多斯	110.47	39.35	1108	6.4	370	黄绵土	温带典型草原	0.342	-27.3 ± 0.2	10
14	伊金霍洛旗	110.05	39.17	1276	6.2	365	黄绵土	温带典型草原	0.338	-27.2 ± 0.3	9
15	东胜	109.98	39.03	1461	5.4	400	黄绵土	温带典型草原	0.370	-27.5 ± 0.2	13
16	右玉	112.27	40.00	1358	8.6	442	栗钙土	温带草甸草原	0.340	-27.4 ± 0.2	8
17	河曲	111.15	39.38	875	8.8	426	黄绵土	温带草甸草原	0.310	-27.0 ± 0.4	8
18	神木	109.54	38.24	1226	8.9	393	黄绵土	温带草甸草原	0.290	-26.6 ± 0.3	11
19	横山	109.17	37.28	1019	8.5	398	黄绵土	温带典型草原	0.320	-26.9 ± 0.3	10
20	靖边	108.50	37.36	1333	7.8	395	风沙土	温带典型草原	0.366	-27.3 ± 0.3	10
21	西吉	105.44	37.57	1931	5.3	400	黄绵土	温带草甸草原	0.370	-26.4 ± 0.2	12
22	榆中	104.02	36.55	1896	6.6	403	黑垆土	温带草甸草原	0.362	-26.6 ± 0.3	10

SS: 采样地点; LO: 经度; LA: 纬度; EV: 海拔; MAT: 年均温; MAP: 年降水; ST: 土壤类型; VT: 植被类型; HI: 湿润指数; SA: 样本; 碳同位素为平均值 ± 标准误; 各样点经纬度与海拔均由全球定位系统 (Magellan GPS Field PRO V™, California) 测定, 年均温和年均降水量来自 1971—2008 年当地气象部门和中国气象科学数据共享服务网 (<http://cdc.cma.gov.cn/shishi/climate.jsp>) 以及国家气象信息中心气象资料室; 土壤、植被类型分别来自 2007 年中国地图出版社出版的《中国土壤图》和 2001 年科学出版社出版的《1:100 万中国植被图集》

1.3 湿润指数的计算

湿润指数 (Humidity index, HI) 是表征某一地区水分收支与热量平衡、综合反映干湿程度的指标, 其表达式为

$$HI = \frac{R}{PE} \quad (2)$$

式中, R 为年降水量 (mm); PE 为可能蒸散量 (mm)。其中, PE 采用便于应用且精度较高的 Holdridge 方法^[41]进行计算, 即把可能蒸散量看成是温度的函数, 用式表示为:

$$PE = 58.93 \times ABT \quad (3)$$

式中 ABT (Annual biology temperature) 是年生物温度 (°C)。年生物温度是出现植物营养生长范围内的平均温度, 一般认为在 0—30°C 之间, 日均温低于 0°C 和高于 30°C 者均排除在外, 于是 ABT 的计算式如下:

$$ABT = 1/12 \sum_{i=1}^{12} T(M > 0) \quad (4)$$

式中, $T(M > 0)$ 为超过 0°C 的月均温, 但超过 30°C 的月均温按 30°C 计算, 低于 0°C 的均按 0°C 计算。结合式 (2) — (4), 可得到湿润指数的计算公式:

$$HI = R / \left(58.93 \times \frac{1}{12} \sum_{i=1}^{12} T(M > 0) \right) \quad (5)$$

1.4 统计分析

采用 SPSS 统计分析软件 (SPSS12.10 for Windows, Chicago, USA) 对数据进行相关分析、回归分析和 One-

Way ANOVA 方差分析,如果方差分析结果显著,则用最小显著极差法(LSD)进行多重比较。

2 结果

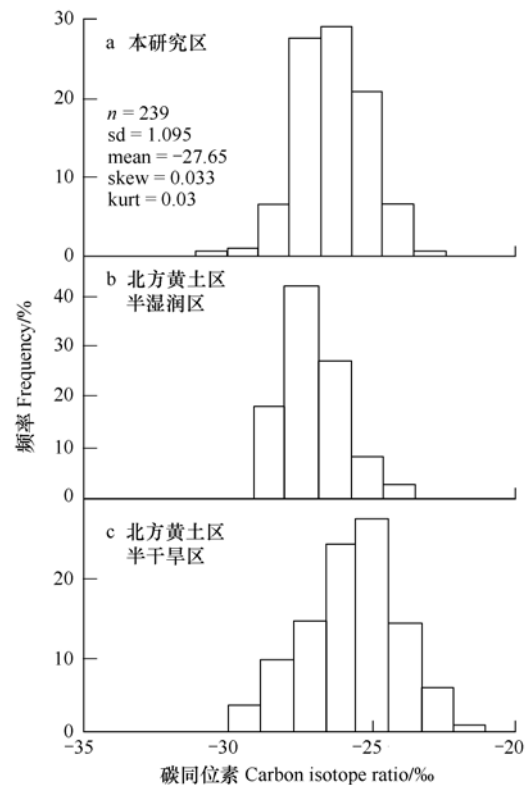
2.1 北方农牧交错带 C₃ 草本植物 $\delta^{13}\text{C}$ 值基本特征

本次研究中共采集了 239 个 C₃ 草本植物样品,包括了 28 个科的 118 种不同的植物,它们的 $\delta^{13}\text{C}$ 值分布如图 2(a) 所示。由图 2(a) 可以看出,我国北方农牧交错带 C₃ 草本植物 $\delta^{13}\text{C}$ 分布区间为 -31.5‰ — -23.0‰ ,其中 98.7% 的数据分布在 -25.0‰ — -29.0‰ 的范围内,其间又以 -26.0‰ — -28.0‰ 的居多,占 83.7%,小于 -29.0‰ 的植物不足 2%,大于 -25.0‰ 的植物则不足 1%,所有 C₃ 植物样品 $\delta^{13}\text{C}$ 平均值为 -27.7‰ 。此外,在所有样点中,各样点植物 $\delta^{13}\text{C}$ 平均值存在明显差异(表 1),最大值出现在海拔最高的宁夏西吉(-26.4‰),最小值发生在年平均温度最低的漠河(-29.1‰)。

2.2 北方农牧交错带 C₃ 草本植物 $\delta^{13}\text{C}$ 与温度的关系

温度是影响植物 $\delta^{13}\text{C}$ 组成的重要因子之一。分析研究区所有 C₃ 草本植物样品($n=239$) 碳同位素组成随温度的变化(图 3),发现植物 $\delta^{13}\text{C}$ 与温度之间呈极显著线性正相关关系($P<0.0001$),随年均温度和夏季平均温度的增加,植物碳同位素均呈偏正的趋势,平均温度每增加 $1.0\text{ }^{\circ}\text{C}$, $\delta^{13}\text{C}$ 值分别变重 0.14‰ 和 0.27‰ 。所有植物的 $\delta^{13}\text{C}$ 值与年平均温度的 R^2 系数为 0.3516(图 3a),与夏季平均温度的 R^2 系数为 0.4276(图 3b)。

就单个 C₃ 草本植物种而言,由于绝大多数植物种受到样本数量的限制而无法进行统计。因此,本文仅选取分布相对较广、数据点相对较多的平车前(*Plantago depressa*)、灰绿藜(*Chenopodium glaucum*)、桃叶蓼(*Polygonum persicaria*)、艾蒿(*Artemisia lavandulaefolia*) 和茵陈蒿(*Artemisia capillaries*) 等 5 种 C₃ 植物进行分



注: 北方黄土区半湿润区和半干旱区碳同位素数据来自文献^[43]

图 2 不同区域 C₃ 草本植物碳同位素分布

Fig. 2 Distribution of carbon isotopes of C₃ herbaceous plants different regions

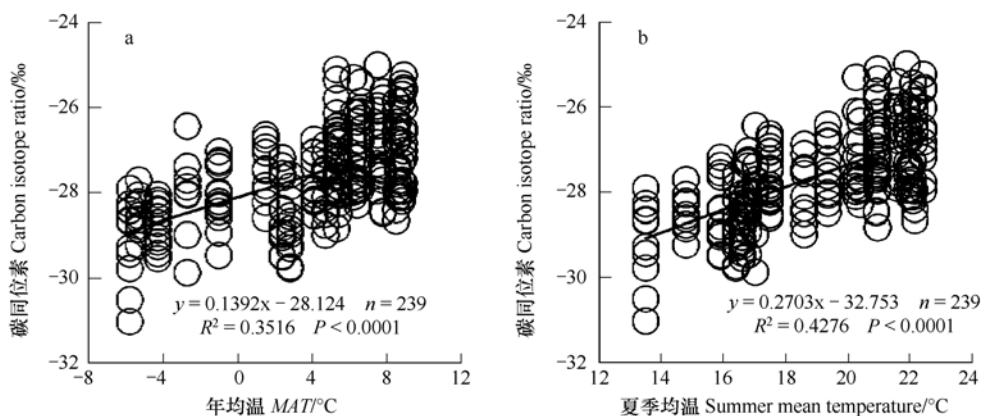
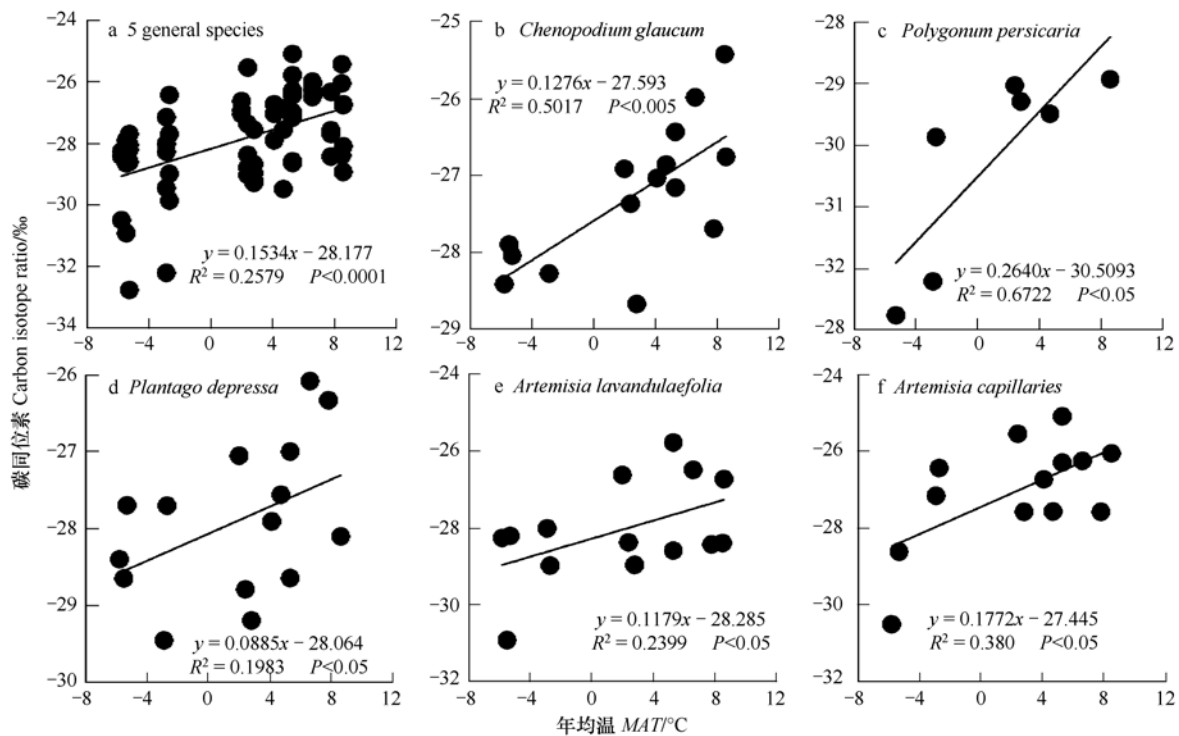


图 3 研究区 C₃ 草本植物碳同位素组成与年平均温度和夏季平均温度的关系

Fig. 3 Relationships between the $\delta^{13}\text{C}$ of C₃ herbaceous plants with average annual temperature and summer average temperature in the study area

析。图4显示,5种广适性植物叶片的 $\delta^{13}\text{C}$ 值均随温度变化表现出一致的趋势,灰绿藜、桃叶蓼和茵陈蒿的 $\delta^{13}\text{C}$ 值与年平均温度均呈显著线性正相关(图4b—4c,图4f),平车前、艾蒿的 $\delta^{13}\text{C}$ 值与年平均温度呈较弱的正相关关系(图4d—4e)。但5个植物种的平均 $\delta^{13}\text{C}$ 值存在明显差异($P < 0.05$),表现为茵陈蒿 > 灰绿藜 > 平车前 > 艾蒿 > 桃叶蓼(表2)。从植物 $\delta^{13}\text{C}$ 随年平均温度增加而变重的幅度(斜率)而言,温度每增高1.0℃,平车前、灰绿藜、桃叶蓼、艾蒿和茵陈蒿的 $\delta^{13}\text{C}$ 分别偏正0.09‰、0.13‰、0.27‰、0.12‰和0.18‰,说明5种C₃广适性植物对温度变化的敏感程度不同。



图注: a为5种广适性植物的所有样品; b—f依次代表灰绿藜、桃叶蓼、平车前、艾蒿和茵陈蒿

图4 研究区5种广适性C₃草本植物叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 与年平均温度的关系

Fig. 4 Relationships between leaf $\delta^{13}\text{C}$ of five general C₃ herb species and the average annual temperature

表2 研究区5种C₃广适性草本植物 $\delta^{13}\text{C}$ 平均值比较

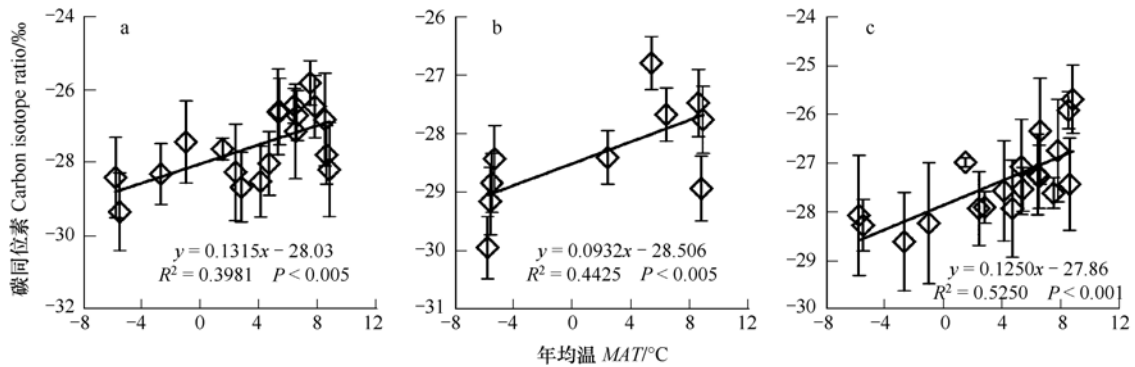
Table 2 The mean $\delta^{13}\text{C}$ value of each general herbaceous plant

植物名 Plant name	$\delta^{13}\text{C}/\text{‰}$ 平均值 ± 标准误差 Mean ± SE	样本/个 Sample	植物名 Plant name	$\delta^{13}\text{C}/\text{‰}$ 平均值 ± 标准误差 Mean ± SE	样本/个 Sample
平车前 <i>Plantago depressa</i>	-27.9 ± 0.3ab	15	艾蒿 <i>Artemisia lavandulaefolia</i>	-28.1 ± 0.4b	14
灰绿藜 <i>Chenopodium glaucum</i>	-27.3 ± 0.2ab	15	茵陈蒿 <i>Artemisia capillaries</i>	-27.0 ± 0.4a	13
桃叶蓼 <i>Polygonum persicaria</i>	-30.2 ± 0.6c	7			

对5种C₃广适性植物碳同位素平均值进行多重比较(LSD法, $P < 0.05$), 同一列中不同字母表示差异显著($P < 0.05$)

根据所采集的118种C₃植物的239个样品,按照草本植物的生活周期,分别对1年生草本、2年生草本和多年生草本植物的 $\delta^{13}\text{C}$ 与年平均温度进行了分析。由图5可看出,不同生活周期草本植物叶片的 $\delta^{13}\text{C}$ 值均随年平均温度的增加表现为持续增加的变化特征,但随温度增加而变重的幅度明显不同。表3显示,不同生活周期草本植物之间的碳同位素组成具有不同程度的差异($P < 0.05$),其 $\delta^{13}\text{C}$ 值表现出如下顺序:1年生草本 < 2年生草本 < 多年生草本。除-1—4℃外,在其它温度范围内,多年生草本的 $\delta^{13}\text{C}$ 值显著偏重于1年生草本。在温度-6—9℃范围,多年生草本的 $\delta^{13}\text{C}$ 值显著高于2年生草本,而在其它温度范围,两者之间的碳同位素没有显著差异,但多年生草本的 $\delta^{13}\text{C}$ 值仍有所偏重。在-6—-1℃和4—9℃温度范围,2年生草本和

1 年生草本的 $\delta^{13}\text{C}$ 值具有显著不同,但在 $-1\sim-4\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $-6\sim-9\text{ }^{\circ}\text{C}$ 范围二者差异却不显著。



图注: 数据点为相应温度所有样品 $\delta^{13}\text{C}$ 的平均值, 垂线代表 $\pm$ 标准偏差; a 代表多年生, b 代表二年生, c 代表一年生

图 5 不同生活周期 C3 草本植物碳同位素与年平均温度的关系

Fig. 5 Relationships between the $\delta^{13}\text{C}$ in C3 herbaceous plants with different life cycle and the annual average temperature

表 3 不同生活周期草本植物碳同位素 (‰) 组成比较

Table 3 Composition of $\delta^{13}\text{C}$ in herbaceous plants with different life cycle

生活周期 Life cycle	年均温度范围 Average annual temperature range			
	$-6\sim-1\text{ }^{\circ}\text{C}$	$-1\sim-4\text{ }^{\circ}\text{C}$	$4\sim9\text{ }^{\circ}\text{C}$	$-6\sim-9\text{ }^{\circ}\text{C}$
1 年生草本 Annual herb	$-29.3 \pm 0.25\text{b}$	$-28.3 \pm 0.25\text{a}$	$-28.2 \pm 0.29\text{b}$	$-28.6 \pm 0.23\text{b}$
2 年生草本 Biennial herb	$-28.2 \pm 0.16\text{a}$	$-28.2 \pm 0.21\text{a}$	$-27.5 \pm 0.16\text{ab}$	$-28.1 \pm 0.23\text{b}$
多年生草本 Perennial herbs	$-28.0 \pm 0.23\text{a}$	$-28.0 \pm 0.24\text{a}$	$-26.9 \pm 0.13\text{a}$	$-27.9 \pm 0.20\text{a}$

同一列中不同字母 a 和 b 表示差异显著 ($P < 0.05$)

3 讨论

3.1 本样带与北方黄土区植物叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值比较

不同光合作用途径的植物具有不同的 $\delta^{13}\text{C}$ 值分布范围。Deines^[42] 曾对全球陆生 C3 植物的 $\delta^{13}\text{C}$ 值进行过统计, 结果发现, 全球 C3 植物的 $\delta^{13}\text{C}$ 值分布在 -22.0‰ — -34.0‰ , 平均值为 -27.0‰ , 其中 90% 左右植物的 $\delta^{13}\text{C}$ 分布在 -24.0‰ — -29.0‰ 。很显然, 本研究区 C3 草本植物 $\delta^{13}\text{C}$ 值的分布范围(图 2a) 是位于全球 C3 植物的 $\delta^{13}\text{C}$ 范围之内, 主要的分布区间亦与全球 $\delta^{13}\text{C}$ 的分布范围基本一致, 平均值 (-27.7‰) 较全球偏负 0.7‰ 。一个可能的原因是本次采集的样品都为草本植物, 前人研究的多为木本植物和灌木植物, 而不同生活型植物的 $\delta^{13}\text{C}$ 一般表现为乔木 $>$ 灌木 $>$ 草本^[23, 43-44]。然而, 与我国北方黄土区生长的 C3 草本植物相比, 本研究区得到的 C3 草本植物 $\delta^{13}\text{C}$ 值分布范围要比来自我国黄土高原中部半湿润区的 149 个 C3 草本植物 $\delta^{13}\text{C}$ 值分布区间 (-24.4‰ — -28.5‰) 要宽得多(图 2b), 平均值偏正 0.3‰ , 但与我国黄土高原西部半干旱-干旱区的 218 个 C3 草本植物的 $\delta^{13}\text{C}$ 分布范围 (-21.7‰ — -30.0‰) 基本一致(图 2c), 仅平均值较之偏负 1.0‰ 。出现这种差异的原因可能与各研究区域的水分条件存在差异有关。据王国安等的报道^[45], 来自北方黄土区的 149 个 C3 草本植物主要采集于陕西洛川、长武、安塞以及甘肃西峰等地, 这些地区年均降水量变化在 480—600 mm, 是较典型的半湿润气候区, 另外的 281 个样品主要采自半干旱-干旱的黄土高原西部边缘区以及相邻的河西走廊等地区, 年均降水量均小于 400 mm, 而本研究区的 239 个样品基本上是沿北方农牧交错带 400 mm 等降水线进行采集的, 其降水量介于半湿润区与半干旱区之间, 而 C3 植物 $\delta^{13}\text{C}$ 一般是随着水分增加而变轻的^[25, 46], 因此降水量大的区域, 植物碳同位素偏轻。由此可以认为, 在上述 3 个气候区, 植物的水分利用效率存在明显差异, 北方黄土区的半干旱-干旱气候区植物的水分利用效率最高, 其次是北方农牧交错带, 水分利用效率最低的是北方黄土区的半湿润区。

3.2 气候因子对植物 $\delta^{13}\text{C}$ 及 WUE 的影响

在植物光合作用过程中, 叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 除了受植物本身遗传因素的影响外, 还受温度、水分状况、光照条件和

大气 CO_2 浓度等的影响。在不同的环境条件下,这些影响因子相对于植物 $\delta^{13}\text{C}$ 组成的意义则不同。本研究中植物样品均采自光照充足、地形平坦开阔的环境中,日常光照远大于 $50 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$,这就排除了环境光照不足对植物 $\delta^{13}\text{C}$ 的影响。此外,本次采集的样品均处于开阔地带,远离工业污染,植物叶片细胞内外 CO_2 的比率几乎与大气 CO_2 浓度无关^[39,47],加上大气 CO_2 的 $\delta^{13}\text{C}$ 值在短时间内变化是很小的,其 $\delta^{13}\text{C}$ 值随海拔、纬度的变化一般稳定在 -8‰ 左右^[48],因而大气 CO_2 浓度及其 $\delta^{13}\text{C}$ 对各样点植物 $\delta^{13}\text{C}$ 的影响可以不予考虑。

降水是影响植物碳同位素组成的一个重要因素,水分亏缺可使植物对 $\delta^{13}\text{C}$ 的分馏能力减弱。一些研究认为,降水量的增加会使植物碳同位素变轻,降水量的减少会使植物碳同位素变重^[32,49]。在本研究中,降水量不会是引起各样点间植物 $\delta^{13}\text{C}$ 存在明显差异的主要因子。这是因为全部样品都是从南向北大致沿 400 mm 等雨线采集的,各样点间的年平均降水量相差不大,最大值与最小值仅相差 79 mm,样点间年均降水量不存在显著差异(表 1),故在此次研究中,可以认为植物样品大致是来自相似的降水环境中,降水量对各样点植物识别 ^{13}C 的能力并不会产生显著影响。

温度对植物碳同位素的分馏也有重要影响,但温度与植物 $\delta^{13}\text{C}$ 之间的关系比较复杂。较多的研究指出温度和植物 $\delta^{13}\text{C}$ 之间存在负相关关系^[31,33,47,50-51],而另一些研究则认为二者间存在正相关关系^[25,29,52-53],还有研究^[38]认为温度对植物 $\delta^{13}\text{C}$ 的影响不明显。这可能是因为不同的植物具有不同的光合最适温度的缘故。本研究显示,温度与整体植物叶片的 $\delta^{13}\text{C}$ 值呈极显著正相关性(图 3),表明温度对北方农牧交错带 400 mm 降水线上植物 $\delta^{13}\text{C}$ 组成有一定影响,但并不认为温度是影响本样带植物碳同位素分馏的控制因子,图中显示的温度与碳同位素的关系可能仅仅是一个表象。之所以这样认为,主要是基于以下两点理由:1) 尽管 Pearman 等^[54]和 Tans 等^[55]认为植物 $\delta^{13}\text{C}$ 组成与温度呈正相关,但前人得出我国北方半干旱、半湿润气候区的 367 个 C3 草本植物碳同位素组成与年均温度之间无论是整体植物还是单个广适性植物都存在负相关关系^[25,45]。此次研究中,各样点的年平均降水量均在 400 mm 附近波动,整个样带正好处于半干旱与半湿润气候区之间,而且部分样点(如甘肃的榆中,陕西的神木、靖边、横山,宁夏的西吉)与部分样品植物(如平车前、藜、艾蒿等)也和前人一致。因此,本样带中的 C3 草本植物 $\delta^{13}\text{C}$ 值与温度之间也应该是负相关关系。这是因为温度对植物 $\delta^{13}\text{C}$ 的作用主要是通过直接影响光合作用过程中的电子转移和羧化酶活性以及调控叶片的气孔导度来改变 C_i 值,从而引起碳同位素分馏^[50,56]。较低的温度一方面增强了水分的粘滞性,影响植物对水分的吸收和吸收后在植物体内的运转,阻止了植物茎流,增大了水势梯度;另一方面,低温可降低植物体内的酶活性并减弱相应的代谢能力,影响植物对碳的吸收、转运和代谢水平,从而导致气孔部分关闭, C_i/C_a 值降低, $\delta^{13}\text{C}$ 值增加^[28,49]。2) Körner 等^[31]认为植物生长的限制因子通常也是控制植物碳同位素分馏的关键因子。在本样带上,夏季平均温度(生长期温度)除漠河只有 13.5°C 外,其余样点均在 $15.0\text{—}22.4^\circ\text{C}$ 之间。据报道^[57],C3 草本植物主要适于生长在温度较低的环境中(如温带和寒带地区),其光合作用最适温度为 $15.0\text{—}25.0^\circ\text{C}$,这与本样带夏季平均温度的范围基本一致。因此,在本样带上,温度不会是导致 C3 草本植物 $\delta^{13}\text{C}$ 分馏的控制因子;相反,由温度升高导致的植物可利用有效水分(或土壤相对湿度)的降低有可能成为影响植物 $\delta^{13}\text{C}$ 分馏的重要环境限制因子。由于在本次研究中对所有样点仅测定了 1 次土壤水分,其结果可能不具有代表性。为此,这里用表征某一地区水分收支与热量平衡、综合反映干湿程度的指标—湿润指数(Humidity index, HI)进行替代。图 6a 显示,植物叶片的 $\delta^{13}\text{C}$ 与湿润指数呈极显著负相关($P < 0.0001$), R^2 系数为 0.4575,表明 C3 植物的碳同位素对环境的湿润程度极其敏感,这与 Winter 等^[58], Stuiver 和 Brazianus^[59]曾报道过的植物 $\delta^{13}\text{C}$ 随湿度(或相对湿度)增加而变轻的结果一致。尽管采样过程中是沿着 400 mm 等降水线进行的,但在整个样带上样点间的年均温度差异较大(表 1)。根据 Morecroft 等的理论^[30],温度对植物 $\delta^{13}\text{C}$ 值的影响与蒸汽压亏缺(VPD)有关,较高的大气温度往往伴随着 VPD 的升高、土壤蒸发和植物蒸腾加强,而当降水量供应不足时土壤中植物可利用水分的量就会减少,大气湿度就会降低。植物为了减少水分蒸腾会使气孔部分关闭,从而引起植物叶内 CO_2 浓度下降,使光合作用产物的 $\delta^{13}\text{C}$ 值升高。统计分析之所以得到图 3 的结果,就是因为在该样带上温度与湿润指数之间存在极显著的负相关关系(图 6b),即随着温度升高,湿润

指数降低。由于植物碳同位素组成与湿润指数呈极显著负相关,从而导致了植物碳同位素组成与温度有显著正相关的假象。虽然一些学者对北美和澳大利亚的研究曾得出温度在某种程度上制约着 C3 植物的 $\delta^{13}\text{C}$ 值及其相对生物量,极端温度可以限制植物的生长,甚至引起死亡^[60],但这些学者研究的环境和本研究样带环境状况相差较大,他们的结论是否具有普遍规律仍需要验证。由此可以认为,在本样带上,C3 草本植物 $\delta^{13}\text{C}$ 对温度的响应规律实质上是温度变化导致的土壤湿润指数变化对植物碳同位素影响的结果,这在一定程度上也表明植物可利用的有效水分(或土壤水分状况)是该区植物生长的最重要环境限制因子。

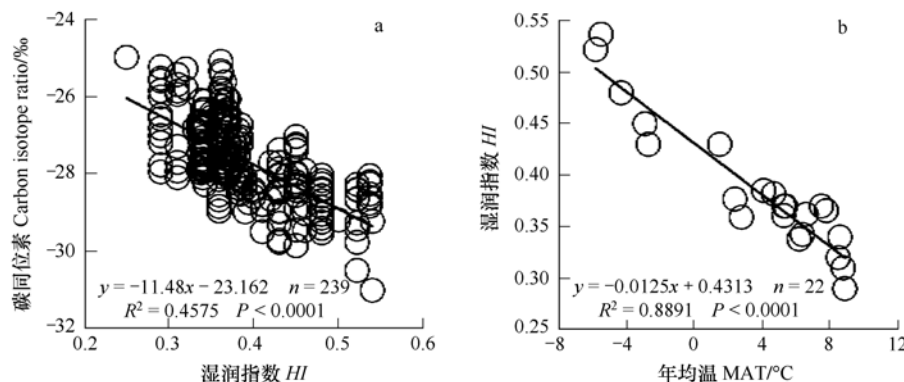


图6 C3 草本植物 $\delta^{13}\text{C}$ 值与年均温度和湿润指数的关系

Fig. 6 Relationships between the $\delta^{13}\text{C}$ values of C3 herbaceous plants, average annual temperature and humidity index

在沿 400 mm 等降雨线采集的 118 种 C3 草本植物中,又对其中的 5 种广适性植物的 $\delta^{13}\text{C}$ 值随年均温度的变化进行了分析(图 4b—f)。结果表明,单个植物的 $\delta^{13}\text{C}$ 也具有随年均温度增加而变重的趋势(其中艾蒿、平车前与年均温度关系不显著, $P > 0.05$),但不同的植物种有不同的变化速率,而且上述每种植物的平均 $\delta^{13}\text{C}$ 值也存在显著差异(表 2),表明它们对温度的敏感程度不同。这里可能有两个方面的原因:1) 不同物种本身对外界环境影响的生理反应有显著差异(如不同物种的气孔密度对环境温度的反应不同,有些物种如 *Abutilon theophrasti* 随温度升高而线性增加,有些物种如 *Quercus rubra* 随温度增加而线性减小或表现出非线性反应),而植物碳同位素的分馏作用既受植物生长期间环境气候状况的影响,也受生物学遗传特性或代谢水平的控制^[31,48,61],植物为适应环境的变化有可能改变其自身的生理特性和本身的叶片结构(如增大叶片厚度等),从而引起植物碳同位素分馏的差异;2) 尽管植物样品是沿 400 mm 等降水线进行采集的,但水分可利用性通常随其它环境因子(如温度、蒸发需求、土壤类型等)发生变化,况且水分可利用性在不同物种间是不一样的,因为不同物种在根深和物候学上有差异。

Farquhar 等^[5]认为,C3 植物的 $\delta^{13}\text{C}$ 与其 WUE 具有很强的正相关性,在一定程度上可作为植物长期 WUE 的间接测定指标。由于影响植物碳同位素的外界因子很多,且各种因子对植物 $\delta^{13}\text{C}$ 的影响程度不同,因此,只有在同一环境或相似条件下生长的植物才能利用 $\delta^{13}\text{C}$ 比较它们之间的 WUE。正如前面所述,在本次研究中,植物样品均采自相似的自然环境中,各样点除温度、土壤湿度存在较大差异外,降水、光照和大气 CO_2 浓度等变化不大,这就排除了光照、降水和大气 CO_2 浓度等对植物碳同位素所产生的差异,而由温度引起的各样点不同的湿润指数成为本次研究中 C3 植物碳同位素分馏的重要环境限制因子(图 6a)。由于植物的 $\delta^{13}\text{C}$ 可以指示植物长期的水分利用效率,因而根据植物叶片的 $\delta^{13}\text{C}$ 值与湿润指数的关系可以揭示植物在本样带上的水分利用状况,即随样点湿润指数的降低,植物 WUE 增加。原因是在 400 mm 等降水线上,植物在生长过程中由于样点温度升高引起蒸发需求增加,土壤水分的可利用性和湿润指数降低,植物为减少体内水分散失往往关闭部分气孔,造成叶内 CO_2 分压降低, C_i/C_a 减小,从而使光合产物的 $\delta^{13}\text{C}$ 比值增大,WUE 提高,这说明生长在不同温度环境下的植物当土壤水分可利用性(或湿润指数)降低以及降雨量不足时可以通过调节自身的生理功能以适应外界环境的变化^[62-63]。

就单个植物种而言,植物的水分利用效率具有遗传性,不同物种或同一物种的不同品种间 WUE 不同^[64-65]。本研究发现,5 种 C3 广适性植物叶片的 $\delta^{13}\text{C}$ 值均随温度上升呈变重趋势,但增加幅度不同(图 4),5 个植物种的 $\delta^{13}\text{C}$ 平均值表现为茵陈蒿 > 藜 > 平车前 > 艾蒿 > 桃叶蓼(表 2),说明不同植物的水分利用状况对温度梯度变化的响应程度不同。这意味着在农牧交错带 400 mm 等降水线上 5 种广适性 C3 植物具有不同的适应环境变化的策略,高 WUE($\delta^{13}\text{C}$)的植物干旱适应能力较强,即使遭受严重干旱,这类植物仍能保持一定的光合速率,而 WUE 较低植物对水分条件变化非常敏感,相对而言更易受干旱胁迫,从而使它们对水分利用的竞争能力存在明显差异。产生这种差异的原因很多,但主要是与这些植物种的水分生态类型、根系特征、叶片的解剖结构和生理生化机制以及不同的生物学遗传特性有关。Farquhar 等^[48]认为,植物水分利用效率是由多个基因决定的,对于不同的植物来说,这些基因位于控制 WUE 的不同染色体上,而植物的水分利用效率与染色体倍数有关,随着染色体倍数的递增,水分利用效率有进一步提高的趋势^[66]。由于本次研究没有对每个植物种的生物学及生理生态特性进行细致的研究,因此,我们只能做出推断,随着环境温度的逐渐升高或湿润指数的降低,不同植物种都能够不同程度地通过降低叶片的气孔导度等途径来提高水分利用效率以适应环境的变化。

3.3 不同寿命 C3 草本植物 $\delta^{13}\text{C}$ 与 WUE 的变化

除了分析总体 C3 植物和 5 种广适性植物 $\delta^{13}\text{C}$ 值随温度的变化特征外,我们还对不同寿命(不同生活周期)的 C3 草本植物进行了比较,结果表明不同生活周期的草本植物叶片平均 $\delta^{13}\text{C}$ 值都随温度升高而表现出显著的变重趋势(图 5a—5c),只是随温度上升而变重的幅度因生活周期不同差异较大,表明不同寿命植物的光合生理过程存在明显的同位素分馏差异。Ehleringer 和 Cooper^[46]与 Schuster 等人^[67]的研究发现,在相同的环境中短寿命植物相对于长寿命植物具有更低的 $\delta^{13}\text{C}$ 值。Smedley 等^[4]曾对美国西北部干旱地区草原群落 42 种植物叶片的 $\delta^{13}\text{C}$ 值进行过对比研究,发现 1 年生草本植物的 $\delta^{13}\text{C}$ 值显著低于多年生植物。本研究结果也表明不同寿命的草本植物其 $\delta^{13}\text{C}$ 值在各温度范围内也表现出相同的趋势:1 年生草本 < 2 年生草本 < 多年生草本(表 3)。尽管如此,但檀文炳等人^[10]在长白山对不同寿命的草本植物 $\delta^{13}\text{C}$ 进行研究时却得出与之完全相反的趋势。得出上述不同结论的原因可能与研究物种以及区域气候环境差异较大有关,Smedley 等^[4]的研究区和本研究区均属于相对干旱瘠薄的生境,而檀文炳等^[10]的研究区域则是在相对较为湿润的地区,其年降雨量达 600—1300 mm。

不同生命周期的植物水分利用效率不同。檀文炳等^[10]的研究表明,不同寿命的草本植物 $\delta^{13}\text{C}$ 值具有显著差异,表现为一年生草本 > 二年生草本 > 多年生草本,即短寿命的草本植物具有更高的水分利用效率。本研究发现,几乎在所有的温度范围内长寿命的草本植物的 $\delta^{13}\text{C}$ 值均高于短寿命的草本植物(表 3),并且不同生活周期的草本植物平均 $\delta^{13}\text{C}$ 值随温度增加的速率不同(图 5),指示长寿命草本植物的水分利用效率比短寿命草本高,这与檀文炳等在长白山地区研究的结果相矛盾,而与前人^[46-67]在沙漠地区所得到的结果一致。不同结果的原因可能与植物生长的水分条件有关。在水分胁迫的条件下,多年生草本植物由于有发达的根系和较深的根系分布,因此相对于 1 年生的草本,它能够利用更深层的土壤水分,其水分利用效率也就可能较 1 年生草本高。但在水分充足的环境中,由于雨水相对充沛,植物不必利用深层的土壤水,仅仅地表水或浅层水就足够它生存,因此,在这种环境条件下多年生草本植物的水分利用效率比 1 年生植物低是有可能的。上述不同寿命植物与水分利用效率之间的这种相关性为研究植物对水分利用的竞争能力、群落变化提供了一个生理依据^[45]。Casper 等^[11]认为,植物在长期的进化适应过程中形成了 2 种不同的水分利用策略,一种是耐旱策略,如多年生植物,这类植物在干旱期间通常具有保守的水分利用方式即较高的 WUE,并保持相对较低的生长速率和光合速率;另一种是避旱策略,如 1 年生植物,这类植物在水分相对充足时具有较低的 WUE,并通过蒸腾耗水保持较高的光合速率和较快的生长速率,以便在干旱来临前完成开花或生活周期。因此,在干旱胁迫环境下耐旱型植物在群落中处于优势地位,而水分条件相对优势环境下则避旱型植物占优势。本研究中,不同生命周期的草本植物 WUE 表现为多年生草本 > 2 年生草本 > 1 年生草本,具有较高 WUE 值($\delta^{13}\text{C}$)

的多年生草本在群落中出现的频度和地上生物量所占的比例都显著增加(数据未给出,将在另文中报道),说明高 WUE 的多年生草本在本样带中具有较强的干旱适应能力,即使遭受由于温度升高引起的严重干旱,这些植物仍能保持一定的光合速率,从而维持较高的生产力^[68],而 WUE 低的短寿命植物对水分条件变化非常敏感,一旦大气温度升高土壤含水量降低其光合速率就明显下降,指示其抵御干旱的能力小于多年生草本。因此,从退化草地生态系统恢复的实践来看,由于多年生草本植物具有较强的适应干旱环境的潜力,在选择物种时应尽量选择这类植物以适应未来环境的变化(如大气 CO_2 浓度升高、温度上升和降水格局改变等)。

4 结论

(1) 中国北方农牧交错带 400 mm 等雨线上 C3 草本植物 $\delta^{13}\text{C}$ 值的分布范围较黄土高原东部半湿润区 C3 草本植物的要宽,平均值较之偏正 0.3‰;而与黄土高原西部干旱-半干旱区 C3 草本植物的范围接近,但平均值偏负 1.0‰,这指示研究样带植物的水分利用效率居于二者之间,其原因可能与相应研究区不同的水分条件有关。

(2) 研究样带 C3 草本植物整体 $\delta^{13}\text{C}$ 值与温度呈极显著正线性关系,且随年均温度和夏季均温升高植物 $\delta^{13}\text{C}$ 值分别偏重 0.14‰/℃ 和 0.27‰/℃,指示植物水分利用效率随环境温度升高而增加。但温度与植物碳同位素的关系仅是一种表象,植物 $\delta^{13}\text{C}$ 对温度的响应实质上是温度升高导致的土壤相对湿度(或气候湿润指数)降低造成水分胁迫进而影响植物碳同位素组成的结果,植物可利用的有效水分是本样带植物碳同位素分馏的控制因子。

(3) 5 种 C3 广适性草本植物 $\delta^{13}\text{C}$ 值均随温度升高呈变重趋势,但变化幅度不同,而且它们之间平均 $\delta^{13}\text{C}$ 值存在明显差异,原因是不同物种对温度的敏感程度不同,表明这 5 种植物对水分利用的竞争能力存在明显差异以及它们具有不同适应环境变化的策略。

(4) 本样带不同寿命的草本植物 $\delta^{13}\text{C}$ 表现为多年生草本 > 2 年生草本 > 1 年生草本,表明它们的水分利用状况不同,这可能与不同寿命草本植物的根系分布与吸水能力有关。

References:

- [1] Yu G R, Wang Q F, Zhang J. Modeling the water use efficiency of soybean and maize plants under environmental stresses: application of a synthetic model of photosynthesis-transpiration based on stomatal behavior. *Journal of Plant Physiology*, 2004, 161: 303-318.
- [2] IPCC. Summary for policymakers//Climate change 2007: The physical science basis. Contribution of working group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, United Kingdom and New York, USA: Cambridge University Press, 2007.
- [3] Stephane P, Lawrence B F, Karrin P A. Comparison of ecosystem water-use efficiency among Douglas-fir forest, aspen forest and grassland using eddy covariance and carbon isotope techniques. *Global Change Biology*, 2006, 12: 294-310.
- [4] Smedley M P, Dawson T E, Comstock G P. Seasonal carbon isotope discrimination in a grassland community. *Oecologia*, 1991, 85: 314-320.
- [5] Farquhar G D, O'leary M H, Berry J A. On the relationship between carbon isotope discrimination and the intercellular carbon dioxide concentration in leaves. *Australian Journal of Plant Physiology*, 1982, 9: 121-137.
- [6] Knight J D, Livingston N J, Vankessel C. Carbon isotope discrimination and water-use efficiency of six crops grown under wet and dry land conditions. *Plant, Cell and Environment*, 1994, 17: 173-179.
- [7] Sun Z J, Livingston N J, Guy R D. Stable carbon isotope as indicators of increased water use efficiency and productivity in white spruce (*Picea glauca* Voss) seedlings. *Plant, Cell and Environment*, 1996, 19: 887-894.
- [8] Picon-Cochard C, Coll L, Balandier P. The role of below-ground competition during early stages of secondary succession: The case of 3-year-old scots pine (*Pinus sylvestris* L.) seedlings in an abandoned grassland. *Oecologia*, 2006, 148: 373-383.
- [9] Dawson T E, Ehleringer J R. Gender-specific physiology, carbon isotope discrimination and habitat distribution in boxelder, *Acer negundo*. *Ecology*, 1993, 74: 798-815.
- [10] Tan W B, Wang G A, Han J M. $\delta^{13}\text{C}$ and water-use efficiency indicated by $\delta^{13}\text{C}$ of different plant functional groups on Changbai Mountains, Northeast China. *Chinese Science Bulletin*, 2009, 10: 1759-1764.
- [11] Casper B B, Forseth N, Wait D A. Variation in carbon isotope discrimination in relation to plant performance in a natural population of *Cryptantha flava*. *Oecologia*, 2005, 145: 541-548.

- [12] Donovan L A, Dudley S A, Rosenthal D M, Ludwig F. Phenotypic selection on leaf water use efficiency and related eco-physiological traits for natural populations of desert sunflowers. *Oecologia*, 2007, 152: 13-25.
- [13] Stewart G R, Turnbull M H, Schimdt S. ^{13}C natural abundance in plant communities along a rainfall gradient: a biological integrator of water availability. *Australian Journal of Plant Physiology*, 1995, 22: 51-55.
- [14] Damesin C, Rambal S, Joffre R. Between tree variations in leaf $\delta^{13}\text{C}$ of *Quercus ilex* among mediterranean habitats with different water availability. *Oecologia*, 1997, 111: 26-35.
- [15] Liu W G, Feng X H, Ning Y F, Zhang Q L, Cao Y N, An Z S. $\delta^{13}\text{C}$ variation of C3 and C4 plants across an Asian monsoon rainfall gradient in arid northwestern China. *Global Change Biology*, 2005, 7: 1094-1100.
- [16] Schulze E D, Williams R J, Farquhar G D. Carbon and nitrogen isotope discrimination and nitrogen nutrition of trees along a rainfall gradient in northern Australia. *Australian Journal of Plant Physiology*, 1998, 25: 413-425.
- [17] Yu G R, Song X, Wang Q F. Water-use efficiency of forest ecosystems in Eastern China and its relations to climatic variables. *New Phytologist*, 2007, 177: 927-937.
- [18] Su B, Han X G, Li L H. Responses of $\delta^{13}\text{C}$ value and water use efficiency of plant species to environmental gradients along the grassland zone of Northeast China Transect. *Acta Phytocologica Sinica*, 2000, 6: 648-655.
- [19] Su P X, Yan Q D. Stable carbon isotope variation in plants and their indicating significances along the inland Heihe River Basin of Northwestern China. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 4: 1616-1624.
- [20] Chen S P, Bai Y F, Han X G. Variations in composition and water use efficiency of plant functional groups based on their water ecological groups in the Xilin River Basin. *Acta Botanica Sinica*, 2003, 10: 1251-1260.
- [21] Wang G A, Han J M. Relations between $\delta^{13}\text{C}$ values of C3 plants in Northwest China and annual precipitation. *Chinese Journal of Geology*, 2001, 36(4): 494-499.
- [22] Xie G D, Guo G M. The relationship between plant stable carbon isotope composition, precipitation and satellite data, Tibet Plateau, China. *Quaternary International*, 2006, 144: 68-71.
- [23] Wang Y T, Li J Y, Liu P. Seasonal differences in leaf carbon isotope composition among landscaping species of different life forms in Beijing, China. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2010, 34(2): 151-159.
- [24] Wang G A, Han J M. $\delta^{13}\text{C}$ variations of C3 plants in dry and rainy seasons. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2001, 21(4): 43-47.
- [25] Wang G A, Han J M, Zhou L P. The relationship between carbon isotope ratios of C3 plants and average annual temperature in Northwest China. *Geology in China*, 2002, 29(1): 55-57.
- [26] Skrzypek G, Kaluzny A, Wojtun B. The carbon stable isotopic composition of mosses: a record of temperature variation. *Organic Geochemistry*, 2007, 38: 1770-1781.
- [27] John H T, Card K A. Temperature effects on the carbon isotope ratio of C3, C4 and grassulacean-acid-metabolism (CAM) plants. *Planta*, 1975, 123: 185-190.
- [28] Smith B N, Hearsh H M W, Chase J B. Effect of growth temperature on carbon isotope ratios in barley, pea and rape. *Plant Cell Physiology*, 1973, 14: 2172-2174.
- [29] Lin Q. Effects of temperature and dissolved inorganic carbon concentration on the carbon isotopic fractionation of *Potamogeton pectinatus*. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 2: 570-576.
- [30] Morecroft M D, Woodward F I. Experiments on the causes of altitudinal differences in the leaf nutrient contents, size and $\delta^{13}\text{C}$ of *Alchemilla* Alpine. *New Phytologist*, 1996, 134: 471-479.
- [31] Körner C H, Farquhar G D, Wong S C. Carbon isotope discrimination by plants follows altitude and altitude trends. *Oecologia*, 1991, 88: 30-40.
- [32] Morecroft M D, Woodward F I. Experimental investigations on the environmental determination of $\delta^{13}\text{C}$ at different altitudes. *Journal of Experimental Botany*, 1990, 41: 1303-1308.
- [33] Li J Z, Wang G A, Liu X Z. Variations in carbon isotope ratios of C3 plants and distribution of C4 plants along an altitudinal transect on the eastern slope of Mount Gongga. *Science in China Series D*, 2009, 10: 1387-1396.
- [34] Sparks J P, Ehleringer J R. Leaf carbon isotope discrimination and nitrogen content for riparian trees along elevational transects. *Oecologia*, 1997, 109: 362-367.
- [35] Wang L, Lu H Y, Wu N Q. Altitudinal trends of stable carbon isotope composition for *poeceae* in Qinghai-Xizang Plateau. *Quaternary Sciences*, 2003, 23(5): 573-580.
- [36] Kogami H, Hanba Y T, Kibe T. CO_2 transfer conductance, leaf structure and carbon isotope composition of *Polygonum cuspidatum* leaves from low and high altitudes. *Plant, Cell and Environment*, 2001, 24: 529-538.
- [37] Cordell S, Goldstein G, Meinzer F C. Allocation of nitrogen and carbon in leaves of *Metrosideros polymorpha* regulates carboxylation capacity and

- $\delta^{13}\text{C}$ along an altitudinal gradient. *Functional Ecology*, 1999, 13: 811-818.
- [38] Zhang C J, Chen F H, Jin M. Study on modern plant C-13 in Western China and its significance. *Chinese Journal of Geochemistry*, 2003, 2: 97-106.
- [39] Wang K Y, Kellomaki S, Li C Y, Zha T S. Light and water-use efficiencies of pine shoots exposed to elevated carbon dioxide and temperature. *Annals of Botany*, 2003, 92: 53-64.
- [40] Han X G, Yan C R, Chen L Z. Stable carbon isotope characteristics of some woody plants in warm temperate zone. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2000, 11(4): 497-500.
- [41] Holdridge L R. Determination of world plant formation from simple climatic data. *Science*, 1947, 105: 367-368.
- [42] Deines P. The isotopic composition of reduced organic carbon//Fritz P, Fontes J C, eds. *Handbook of Environmental Isotope Geochemistry I, The Terrestrial Environment*. Amsterdam: Elsevier, 1980, 329-406.
- [43] Wang G, Han J, Faiia A. 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. *Physiology Plant*, 2008, 134: 64-73.
- [44] Brooks J R, Flanagan L B, Buchmann N. Carbon isotope composition of boreal plants: Functional grouping of life forms. *Oecologia*, 1997, 110: 301-311.
- [45] Wang G A, Han J M, Liu D S. The carbon isotope composition of C3 herbaceous plants in loess area of northern China. *Science in China Series D*, 2003, 10: 1070-1076.
- [46] Ehleringer J R, Cooper T A. Correlations between carbon isotope ratio and microhabitat in desert plants. *Oecologia*, 1988, 76: 62-66.
- [47] Kerner C H, Farquhar G D, Roksandic Z. A global survey of carbon isotope discrimination in plants from high altitude. *Oecologia*, 1988, 74: 623-632.
- [48] Farquhar G D, Ehleringer J R, Hubick K T. Carbon isotope discrimination and photosynthesis. *Annual Review of Plant Physiology*, 1989, 40: 503-537.
- [49] Devitt D A, Smith S D, Neuman D S. Leaf carbon isotope ratios in three landscape species growing in an arid environment. *Journal of Arid Environments*, 1997, 2: 249-257.
- [50] Francey R J, Gifford R M, Sharkey T D. Physiological influences on carbon isotope discrimination in huon pine (*Lagarostrobos franklinii*). *Oecologia*, 1985, 66: 211-218.
- [51] Ning Y F, Liu W G, Cao Y N. How does the carbon isotope composition response to the climate during the plant growing. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2002, 3: 105-108.
- [52] Liu X H, Zhao L J, Gasaw M. Foliar $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{15}\text{N}$ values of C3 plants in the Ethiopia Rift Valley and their environmental controls. *Chinese Science Bulletin*, 2007, 9: 1265-1273.
- [53] Li X B, Chen J F, Zhang P Z. The characteristics of carbon isotope composition of modern plants over Qinghai Tibet Plateau (NE) and its climatic information. *Acta Sedimentologica Sinica*, 1999, 17(2): 325-329.
- [54] Pearman G I, Francey R J, Fraser P B. Climatic implications of stable isotopes in tree rings. *Nature*, 1976, 260: 771-772.
- [55] Tans P P, Mook W G. Past atmospheric CO_2 levels and $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ ratios in tree rings. *Tellus*, 1980, 32: 268-283.
- [56] Ziegler H. Stable isotopes in plant physiology and ecology. *Progress in Botany*, 1995, 56: 1-24.
- [57] Pritchard S G, Rogers H H, Prior S A. Elevated CO_2 and temperature and plant structure; a review. *Global Change Biology*, 1999, 5: 807-837.
- [58] Winter K, Holtum J A, Edwards G E. Effect of low relative humidity on $\delta^{13}\text{C}$ value in two C3 grasses and in *Panicum milioides*, a C3-C4 intermediates species. *Journal of Experimental Botany*, 1982, 32: 88-91.
- [59] Stuiver M, Braziunas T F. Tree cellulose $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ isotope ratios and climatic change. *Nature*, 1987, 328: 58-60.
- [60] Bird M, Pousai P. Carbon isotope variations in the surface soil organic carbon pool. *Global Biogeochemical Cycles*, 1997, 3: 313-322.
- [61] Saurer M, Siegenthaler U, Schweingruber F. Carbon isotope discrimination indicates improving water-use efficiency of trees in northern Eurasia over the last 100 years. *Global Change Biology*, 2004, 10: 2109-2120.
- [62] Sun B N, Dilcher D L, Beerling D J. Variation in *Ginkgo biloba* L. leaf characters across a climatic gradient in China. *Proceedings National Academy of Sciences U S A*, 2003, 100(12): 7141-7146.
- [63] Saurer M, Siegenthaler U, Schweingruber F. The climate-carbon isotope relationship in tree rings and significance of site conditions. *Tellus B*, 1995, 47: 320-330.
- [64] Funk J L, Vitousek P M. Resource use efficiency and plant invasion in low-resource systems. *Nature*, 2007, 446: 1079-1081.
- [65] Condon A G, Farquhar G D, Richards R A. Genotypic variation in carbon isotope discrimination and transpiration efficiency in wheat. *Australian Journal of Plant Physiology*, 1990, 17: 9-22.
- [66] Handley L L, Nevo E, Raven J A. Chromosome 4 controls potential of water use efficiency ($\delta^{13}\text{C}$) in barley. *Journal of Experimental Botany*, 1994,

280: 1661-1663.

- [67] Schuster W S, Sandquist D R, Phillips S L. Comparisons of carbon isotope discrimination in populations of arid land plant species differing in lifespan. *Oecologia*, 1992, 91: 332-337.
- [68] Tsialtas J T, Handley L L, Kassoumi M T. Inter-specific variation in potential water use efficiency and its relation to plant species abundance in water-limited grassland. *Functional Ecology*, 2001, 15: 605-614.

参考文献:

- [10] 檀文炳, 王国安, 韩家懋. 长白山不同功能群植物碳同位素及其对水分利用效率的指示. *科学通报*, 2009, 54(13): 1912-1916.
- [18] 苏波, 韩兴国, 李凌浩. 中国东北样带草原区植物 $\delta^{13}\text{C}$ 值及水分利用效率对环境梯度的响应. *植物生态学报*, 2000, 6: 648-655.
- [19] 苏培玺, 严巧娣. 内陆黑河流域植物稳定碳同位素变化及其指示意义. *生态学报*, 2008, 4: 1616-1624.
- [21] 王国安, 韩家懋. 中国西北 C3 植物的碳同位素组成与年降雨量关系初探. *地质科学*, 2001, 36(4): 494-499.
- [23] 王玉涛, 李吉跃, 刘平. 不同生活型绿化植物叶片碳同位素组成的季节特征. *植物生态学报*, 2010, 34(2): 151-159.
- [24] 王国安, 韩家懋. C3 植物碳同位素在旱季和雨季中的变化. *海洋地质与第四纪地质*, 2001, 21(4): 43-47.
- [25] 王国安, 韩家懋, 周力平. 中国北方 C3 植物碳同位素组成与年均温度关系. *中国地质*, 2002, 29(1): 55-57.
- [29] 林清. 温度和无机碳浓度对龙须眼子菜 (*Potamogeton pectinatus*) 碳同位素分馏的影响. *生态学报*, 2008, 28(2): 570-576.
- [33] 李嘉竹, 王国安, 刘贤赵. 贡嘎山东坡 C3 植物碳同位素组成及 C4 植物分布沿海拔高度的变化. *中国科学 D 辑: 地球科学*, 2009, 39(10): 1387-1396.
- [35] 旺罗, 吕厚远, 吴乃琴. 青藏高原现生禾本科植物的 $\delta^{13}\text{C}$ 与海拔高度的关系. *第四纪研究*, 2003, 23(5): 573-580.
- [40] 韩兴国, 严昌荣, 陈灵芝. 暖温带地区几种木本植物碳稳定同位素的特点. *应用生态学报*, 2000, 11(4): 497-500.
- [45] 王国安, 韩家懋, 刘东生. 中国北方黄土区 C3 草本植物碳同位素组成研究. *中国科学 D 辑*, 2003, 33(6): 550-556.
- [51] 宁有丰, 刘卫国, 曹蕴宁. 植物生长过程中碳同位素分馏对气候的响应. *海洋地质与第四纪地质*, 2002, 3: 105-108.
- [52] 刘晓宏, 赵良菊, Gasaw M. 东非大裂谷埃塞俄比亚段内 C3 植物叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{15}\text{N}$ 及其环境指示意义. *科学通报*, 2007, 52(2): 199-206.
- [53] 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. *沉积学报*, 1999, 17(2): 325-329.

CONTENTS

Spatial pattern analysis of a <i>Rhododendron-Abies</i> virginal forest near timberline on the eastern edge of Qinghai-Tibetan Plateau, China	MIAO Ning, LIU Shirong, SHI Zuomin, et al (1)
Changes of liana species diversity in different restoration stages of monsoonal broad-leaved evergreen forest	LI Shuaifeng, SU Jianrong, LIU Wande, et al (10)
Investigation on spatio-temporal pattern of cyanobacterial community structure by T-RFLP during overwinter and recruitment period in Taihu Lake	GU Tingting, KONG Fanxiang, TAN Xiao, et al (21)
Food sources of fish and macro-invertebrates in a tropical seagrass bed at Xincun Bay, Southern China	FAN Minling, HUANG Xiaoping, ZHANG Dawen, et al (31)
Spatial pattern of Scleractinian coral Population Structure in Weizhou Island, Beihai, Guangxi	LIANG Wen, ZHANG Chunhua, YE Zuchao, et al (39)
Property of root distribution of triploid <i>Populus tomentosa</i> and its relation to root water uptake under the wide-and-narrow row spacing scheme	XI Benye, WANG Ye, JIA Liming, et al (47)
Soil nutritional properties and moisture gradient of the ecotone between dry valley and montane forest of the Minjiang River	LIU Bin, LUO Chengde, ZHANG Jian, et al (58)
Signal chemical salicylic acid mitigates the negative effects of drought on photosynthesis and membrane lipid peroxidation of purple majesty	YI Xiaolin, YANG Bingxian, ZONG Xuefeng, et al (67)
Effects of supplementary UV-B radiation on life cycle forms and the accumulation of taxanes of <i>Taxus chinensis</i> var. <i>mairei</i>	YU Jinghua, LI Dewen, PANG Haihe, et al (75)
Effect of simulated nitrogen deposition on the soil respiration of <i>Lithocarpus glabra</i> and <i>Castanopsis sclerophylla</i>	LI Kai, JIANG Hong, YOU Meina, et al (82)
Changes of phenolic acids in the soil of replanted apple orchards surrounding Bohai Gulf	SUN Haibing, MAO Zhiqian, ZHU Shuhua (90)
Growing dynamic root system of <i>Aquilaria malaccensis</i> and <i>Aquilaria sinensis</i> seedlings in response to different fertilizing methods	WANG Ran, LI Jiyue, ZHANG Fangqiu, et al (98)
Accumulation and tolerance of <i>Salix variegata</i> and <i>Pterocarya stenoptera</i> seedlings to cadmium	JIA Zhongmin, WEI Hong, SUN Xiaocan, et al (107)
Dynamics of vegetation structure and soil properties in the natural restoration process of degraded woodland on the northern slope of Qilian Mountains, northwestern China	ZHAO Chengzhang, SHI Fuxi, DONG Xiaogang, et al (115)
Relationship between temperature and $\delta^{13}\text{C}$ values of C3 herbaceous plants and its implications of WUE in farming-pastoral zone in North China	LIU Xianzhao, WANG Guoan, LI Jiazhu, et al (123)
Carbon dynamics of fine root (grass root) decomposition and active soil organic carbon in various models of land use conversion from agricultural lands into forest lands	RONG Li, LI Shoujian, LI Xianwei, et al (137)
Prey biomass of the Amur tiger (<i>Panthera tigris altaica</i>) in the eastern Wanda Mountains of Heilongjiang Province, China	ZHOU Shaochun, ZHANG Minghai, SUN Haiyi (145)
The impact of conservation projects on giant Panda Habitat	ZHANG Yubo, WANG Mengjun, LI Junqing (154)
Fluctuation of soil fauna community during defoliation decomposition under lime and EM treatment	GAO Meixiang, ZHANG Xueping (164)
Comparative of feeding behaviors of <i>Sitobion avenae</i> , <i>Sitobion graminum</i> and <i>Rhopalosiphum padi</i> (Homoptera: Aphididae) using electrical penetration graph (EPG)	MIAO Jin, WU Yuqing, YU Zhenxing, et al (175)
Toxic effects of <i>ent</i> -kaurane diterpenoids on soil ciliate communities	NING Yingzhi, DU Haifeng, WANG Hongjun (183)
Geostatistical analysis and sampling technique on spatial distribution pattern of <i>Dendroctonus valens</i> population	PAN Jie, WANG Tao, ZONG Shixiang, et al (195)
Variation analysis of protein subunits of soybean germplasms of different eco-types in Shanxi	WANG Yanping, LI Guiquan, GUO Shujin, et al (203)
Effects of fertilization and plastic film mulched ridge-furrow cultivation on yield and water and nitrogen utilization of winter wheat on dryland	LI Tingliang, XIE Yinghe, REN Miaomiao, et al (212)
The changing characteristics of potential climate productivity in Gansu Province during nearly 40 years	LUO Yongzhong, CHENG Ziyong, GUO Xiaoqin (221)
Spatial assessment and zoning regulations of ecological importance based on GIS for rural habitation in Changgang Town, Xinguo county	XIE Hualin, LI Xiubin (230)
Influences of rural households' income differences on living energy consumption and eco-environment: a case study of Jiangnan Plain, China	YANG Zhen (239)
Spatial differences and its driving factors of emergy indices on cultivated land eco-economic system in Hebei Province	WANG Qian, JIN Xiaobin, ZHOU Yinkang, et al (247)
Effects of land use on distribution and protection of organic carbon in soil aggregates in karst rocky desertification area	LUO Youjin, WEI Chaofu, LI Yu, et al (257)
Review and Monograph	
Implication and limitation of landscape metrics in delineating relationship between landscape pattern and soil erosion	LIU Yu, LÜ Yihe, FU Bojie (267)
Ecological reclamation and restoration of abandoned coal mine in the United States	ZHANG Chengliang, B. Larry Li (276)
Managing farmland soil food web: principles and methods	CHEN Yunfeng, HU Cheng, LI Shuanglai, et al (286)

2009 年度生物学科总被引频次和影响因子前 10 名期刊*

(源于 2010 年版 CSTPCD 数据库)

排序 Order	期刊 Journal	总被引频次 Total citation	排序 Order	期刊 Journal	影响因子 Impact factor
1	生态学报	11764	1	生态学报	1.812
2	应用生态学报	9430	2	植物生态学报	1.771
3	植物生态学报	4384	3	应用生态学报	1.733
4	西北植物学报	4177	4	生物多样性	1.553
5	生态学杂志	4048	5	生态学杂志	1.396
6	植物生理学通讯	3362	6	西北植物学报	0.986
7	JOURNAL OF INTEGRATIVE PLANT BIOLOGY	3327	7	兽类学报	0.894
8	MOLECULAR PLANT	1788	8	CELL RESEARCH	0.873
9	水生生物学报	1773	9	植物学报	0.841
10	遗传学报	1667	10	植物研究	0.809

★《生态学报》2009 年在核心版的 1964 种科技期刊排序中总被引频次 11764 次,全国排名第 1;影响因子 1.812,全国排名第 14;第 1—9 届连续 9 年入围中国百种杰出学术期刊;中国精品科技期刊

编辑部主任: 孔红梅

执行编辑: 刘天星 段 靖

生态学报
(SHENGTAI XUEBAO)
(半月刊 1981 年 3 月创刊)
第 31 卷 第 1 期 (2011 年 1 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA
(Semimonthly, Started in 1981)
Vol. 31 No. 1 2011

编辑	《生态学报》编辑部 地址:北京海淀区双清路 18 号 邮政编码:100085 电话:(010)62941099 www.ecologica.cn shengtaixuebao@rcees.ac.cn	Edited by	Editorial board of ACTA ECOLOGICA SINICA Add:18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China Tel:(010)62941099 www.ecologica.cn Shengtaixuebao@rcees.ac.cn
主编	冯宗炜	Editor-in-chief	FENG Zong-Wei
主管	中国科学技术协会	Supervised by	China Association for Science and Technology
主办	中国生态学会 中国科学院生态环境研究中心 地址:北京海淀区双清路 18 号 邮政编码:100085	Sponsored by	Ecological Society of China Research Center for Eco-environmental Sciences, CAS Add:18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China
出版	科学出版社 地址:北京东黄城根北街 16 号 邮政编码:100717	Published by	Science Press Add:16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印刷	北京北林印刷厂	Printed by	Beijing Bei Lin Printing House, Beijing 100083, China
发行	科学出版社 地址:东黄城根北街 16 号 邮政编码:100717 电话:(010)64034563 E-mail:journal@cspg.net	Distributed by	Science Press Add:16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China Tel:(010)64034563 E-mail:journal@cspg.net
订购	全国各地邮局	Domestic	All Local Post Offices in China
国外发行	中国国际图书贸易总公司 地址:北京 399 信箱 邮政编码:100044	Foreign	China International Book Trading Corporation Add:P. O. Box 399 Beijing 100044, China
广告经营 许可证	京海工商广字第 8013 号		

