

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第35卷 第9期

Vol.35 No.9

2014

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

长江三角洲地区霾判别方法的对比分析 刘晓慧,朱彬,高晋徽,张恩红,王红磊,陈焯鑫,王姝 (3239)

1980~2012年江苏省城市霾日的时空分布及成因分析 刘端阳,魏建苏,严文莲,吕军,孙燕 (3247)

瓦里关大气二氧化碳和甲烷时间变化特征 刘鹏,张国庆,王剑琼,吴昊,李宝鑫,王宁章 (3256)

上海城区PM_{2.5}中有机碳和元素碳变化特征及来源分析 张懿华,王东方,赵倩彪,崔虎雄,李娟,段玉森,伏晴艳 (3263)

亚青会期间南京市气溶胶中OC和EC的粒径分布 王红磊,朱彬,安俊琳,段卿,邹嘉南,沈利娟 (3271)

无锡市冬季典型天气PM_{2.5}中碳组分的污染特征 云龙,陆钊,张天舒,伍德侠,盛世杰,陆亦怀,刘建国 (3280)

高炉炼铁工艺细颗粒物PM_{2.5}排放特性分析 范真真,赵亚丽,赵浩宁,梁兴印,孙静雯,王保贵,王亚军 (3287)

重庆市北碚城区大气中VOCs组成特征研究 祁心,郝庆菊,吉东生,张军科,刘子锐,胡波,王跃思,江长胜 (3293)

双组分VOCs的催化氧化及动力学分析 卜龙利,杨力,孙剑宇,梁欣欣,虎雪姣,孟海龙 (3302)

汽车排放超细颗粒物浓度及粒径谱特征的实验研究 陆叶强,陈秋方,孙在,蔡志良,杨文俊 (3309)

疏勒河上游地表水水化学主离子特征及其控制因素 周嘉欣,丁永建,曾国雄,吴锦奎,秦甲 (3315)

河流库区沉积物-水界面营养盐及气态氮的释放过程和通量 陈朱虹,陈能汪,吴殷琪,莫琼利,周兴鹏,鲁婷,田蕴 (3325)

大辽河感潮段及其近海河口重金属空间分布及污染评价 张雷,秦延文,马迎群,赵艳民,时瑶 (3336)

雅鲁藏布江中段表层沉积物重金属形态分布及风险评价 柏建坤,李潮流,康世昌,陈鹏飞,王建力 (3346)

北京奥林匹克公园地表颗粒物粒度特征分析 李海燕,石安邦,瞿杨晨,岳靖淋 (3352)

黄河表层沉积物中类二噁英多氯联苯水平分布 李光耀,金军,何畅,王英,马召辉,李明园 (3358)

合肥城郊典型源头溪流不同渠道形态的氮磷滞留特征 李如忠,杨继伟,钱靖,董玉红,唐文坤 (3365)

基于水资源调度的平原河网区城市河道氮迁移转化研究 刘波,盛明,朱强,杨霜,檀炳超,范冉,南旭军,何茂阳,王国祥 (3373)

杭州湾潮滩湿地植物不同分解过程及其磷素动态 邵学新,梁新强,吴明,叶小齐,蒋科毅 (3381)

基于数据同化的太湖叶绿素多模型协同反演 李渊,李云梅,吕恒,朱利,吴传庆,杜成功,王帅 (3389)

天然日光辐照下两江交汇处溶解性有机质(DOM)光漂白过程:以涪江-嘉陵江为例 高洁,江韬,闫金龙,魏世强,王定勇,卢松,李璐璐 (3397)

利用紫外-可见吸收光谱估算三峡库区消落带水体、土壤和沉积物溶解性有机质(DOM)浓度 李璐璐,江韬,卢松,闫金龙,高洁,魏世强,王定勇,郭念,赵铮 (3408)

Cu₂O-Ag-AgBr/MA可见光催化剂的制备及其降解2-氯苯酚的研究 王冉,周雪峰,胡学香,胡春 (3417)

不同粒径零价铁活化过硫酸钠氧化降解酸性橙7的影响及动力学研究 李欢旋,王金泉,马邕文,黄明智,王艳,陈杨梅 (3422)

还原脱氯-生物联合降解2,4-二氯苯氧乙酸 周红艺,曾思思,梁思,韩鉴 (3430)

多介质土壤滤层系统(MSL)与潜流式人工湿地技术处理海水养殖废水的效能比较 宋颖,黄玉婷,葛川,张浩,陈昕,张志剑,罗安程 (3436)

不同碳源在污水处理过程中的变化规律研究 金鹏康,常晋,王先宝,刘柯君,王晓昌 (3443)

气升装置对厌氧氨氧化反应器脱氮效能的影响 李祥,张大林,黄勇,陈宗炬,袁怡 (3449)

微波及其组合工艺强化污泥厌氧消化研究 刘吉宝,倪晓棠,魏源送,佟娟,王亚炜 (3455)

“热水解-高温厌氧消化”工艺处理高含固率剩余污泥的中试研究 吴静,王广启,曹知平,李中华,胡玉瑛,王凯军,左剑恶 (3461)

温度对ABR-MBR复合工艺处理生活污水的影响及其微生物群落分析 吴鹏,陆爽君,徐乐中,刘捷,沈耀良 (3466)

污水处理厂尾水细菌群落结构分析 徐爱玲,任杰,宋志文,吴等等,夏岩 (3473)

沼液养殖钝顶螺旋藻的中试研究 国青青,刘锐,罗金飞,王根荣,陈吕军,刘笑 (3480)

内源呼吸过程溶解性代谢产物的光谱特性分析 李志华,张芹,白旭丽,刘毅 (3487)

基于呼吸图谱的自养菌与异养菌内源呼吸过程分析 李志华,白旭丽,张芹,刘毅,贺春博 (3492)

S-异丙甲草胺与镉对斜生栅藻光合作用的影响 陈彩东,胡晓娜,章小强,刘惠君 (3498)

影响浑太河流域鱼类群落结构的不同尺度环境因子分析 李艳利,李艳粉,徐宗学 (3504)

河口区新建河道轮虫群落演替及与水环境的关系 马文华,张玮,顾琬雯,张瑞雷,王丽卿 (3513)

Fontibacter sp. SgZ-2厌氧腐殖质/Fe(III)还原特性及电子传递机制研究 马晨,杨贵芹,陆琴,周顺桂 (3522)

基于UNMIX模型的夹皮沟金矿区土壤重金属源解析 艾建超,王宁,杨净 (3530)

石河子市土壤环境磁学特征及空间分布研究 杨涵,熊黑钢,陈学刚 (3537)

不同施磷量(KH₂PO₄)作用对Cu、Zn在红壤中的迁移转化 郭亮,李忠武,黄斌,王艳,张艳 (3546)

硫素对水稻吸收砷的生物有效性及其在土壤中的形态影响 杨世杰,唐冰培,王代长,饶伟,张亚楠,王丹,朱云集 (3553)

硫对土壤中硒形态变化及油菜硒吸收的影响 刘新伟,段碧辉,夏全杰,矫威,郭再华,胡承孝,赵竹青 (3564)

再生水灌溉对土壤化学性质及可培养微生物的影响 龚雪,王继华,关键飞,杨雪辰,陈黛慈 (3572)

西南喀斯特山区寿竹林地土壤微生物量与酶活性在不同坡位和剖面层次的分布特征 秦华军,何丙辉,赵旋池,李源,毛文韬,曾清平 (3580)

黔中喀斯特石漠化区不同土壤类型对常见植物叶片δ¹³C值的影响 杜雪莲,王世杰,罗绪强 (3587)

碳底物含量对厌氧条件下水稻土N₂、N₂O、NO、CO₂和CH₄排放的影响 陈诺,廖婷婷,王睿,郑循华,胡荣桂, Klaus Butterbach-Bahl (3595)

北京市典型绿化灌木阻滞吸附PM_{2.5}能力研究 梁丹,王彬,王云琦,张会兰,杨松楠,李昂 (3605)

污泥焚烧过程中氯化物对Cd迁移行为的影响 刘敬勇,卓钟旭,孙水裕,罗光前,李晓明,谢武明,王玉洁,杨佐毅,赵素莹 (3612)

京津冀区域生产和消费CO₂排放的时空特点分析 汪浩,陈操操,潘涛,刘春兰,陈龙,孙莉 (3619)

水泥工业大气污染物排放控制水平确立研究 任春,江梅,邹兰,李晓倩,魏玉霞,赵国华,张国宁 (3632)

《环境科学》征稿简则(3279) 《环境科学》征订启事(3545) 信息(3364,3486,3552,3563)

黔中喀斯特石漠化区不同土壤类型对常见植物叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值的影响

杜雪莲^{1,2}, 王世杰^{2,3}, 罗绪强^{2,4}

(1. 贵州财经大学资源与环境管理学院, 贵阳 550025; 2. 中国科学院地球化学研究所环境地球化学国家重点实验室, 贵阳 550002; 3. 中国科学院普定喀斯特生态系统观测研究站, 普定 562100; 4. 贵州师范学院地理与旅游学院, 贵阳 550018)

摘要: 通过测定黔中喀斯特区清镇市王家寨小流域内常见种叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值, 探讨土壤类型和石漠化等级对喀斯特植物水分利用效率的影响. 结果表明, 小流域内不同土壤类型植物叶片的 $\delta^{13}\text{C}$ 值总体差异不显著($P > 0.05$), 黄壤区植物叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值分布区间较黑色石灰土区窄, 变异系数较小, 整体较黑色石灰土区偏负. 小流域内黑色石灰土区植物群落 $\delta^{13}\text{C}$ 均值随石漠化进行趋正, 黄壤区随石漠化呈现出先趋正后趋负的变化格局. 方差分析结果显示黄壤区各石漠化植物群落 $\delta^{13}\text{C}$ 值间不存在显著差异($P > 0.05$), 黑色石灰土区各石漠化植物群落 $\delta^{13}\text{C}$ 值间均存在显著($P < 0.05$)或极显著差异($P < 0.01$). 相关分析结果显示黄壤区植物叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值的主要影响因子为土厚和坡度, 黑色石灰土区为土壤含水量. 研究区土壤对植被 $\delta^{13}\text{C}$ 值的影响是通过调节土壤水分实现的.

关键词: 喀斯特石漠化; $\delta^{13}\text{C}$ 值; 黄壤; 黑色石灰土; 水分利用效率

中图分类号: X142; X171.1 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2014)09-3587-08 DOI: 10.13227/j.hjks.2014.09.047

Effects of Different Soil Types on the Foliar $\delta^{13}\text{C}$ Values of Common Local Plant Species in Karst Rocky Desertification Area in Central Guizhou Province

DU Xue-lian^{1,2}, WANG Shi-jie^{2,3}, LUO Xu-qiang^{2,4}

(1. Department of Resources and Environment Management, Guizhou University of Finance and Economics, Guiyang 550025, China; 2. State Key Laboratory of Environmental Geochemistry, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550002, China; 3. Puding Karst Ecosystem Research Station, Chinese Academy of Sciences, Puding 562100, China; 4. School of Geography and Tourism, Guizhou Normal College, Guiyang 550018, China)

Abstract: By measuring the foliar $\delta^{13}\text{C}$ values of common local plant species grown in different soil types in Wangjiashai catchments, a typical karst desertification area in Qingzhen City, Central Guizhou, we studied the impact of soil type and rocky desertification grade on the foliar $\delta^{13}\text{C}$ values. The results showed that the foliar $\delta^{13}\text{C}$ values were more negative in yellow soil area than those in black calcareous area and there was no obvious difference in foliar $\delta^{13}\text{C}$ values between these two soil types. The distribution interval of foliar $\delta^{13}\text{C}$ values in yellow soil area was narrower than those in black calcareous area and the variation coefficient of foliar $\delta^{13}\text{C}$ values in yellow soil area were smaller than those in black calcareous area. With increasing degree of karst rocky desertification, the foliar $\delta^{13}\text{C}$ values of plant community in black calcareous area increased, whereas those in yellow soil area first increased and then decreased. The result of multiple comparison showed that the difference in foliar $\delta^{13}\text{C}$ values of plant community among rocky desertification grade was not obvious in yellow soil area, but it was obvious in black calcareous area. Correlation analysis between the foliar $\delta^{13}\text{C}$ values of plant species and the main environmental factors indicated that slope and soil thickness were the main factors which affected the foliar $\delta^{13}\text{C}$ values of plants in yellow soil area and soil water content was the main factor in black calcareous area. The impact of soil on the foliar $\delta^{13}\text{C}$ values was realized by adjusting the soil moisture in study area.

Key words: karst rocky desertification; $\delta^{13}\text{C}$ values; yellow soil; black calcareous; water use efficiency

喀斯特石漠化是指在亚热带地区喀斯特强烈发育的自然环境背景下, 受人为活动的干扰破坏, 造成土壤严重侵蚀, 基岩大面积出露, 生产力严重下降的土地退化现象^[1]. 石漠化导致喀斯特土壤、水环境要素缺损, 环境与生态之间的物质能量传递受阻, 植物生境严酷^[2], 普遍遭受水分胁迫. 喀斯特地区虽然地形起伏不大, 但其独特的二元结构水文系统使该区具有高度的生境异质性. 黄壤是喀斯特地区的

地带性土壤, 在地势陡峭、地形崎岖的区域易在负地形中残留土壤形成年轻的黑色石灰土, 其理化性质较好, 剖面分化不明显, 在地势较平坦的区域易形

收稿日期: 2014-01-27; 修订日期: 2014-03-24

基金项目: 国家自然科学基金项目(41203063, 31100187); 国家重点基础研究发展规划(973)项目(2013CB956700)

作者简介: 杜雪莲(1981~), 女, 博士, 副教授, 主要研究方向为喀斯特生态学和环境地球化学, E-mail: duxuelian520@163.com

成黄色石灰土,其理化性质介于黑色石灰土与黄壤之间^[3]. 土壤是植物水分和养分的重要来源,不同土壤条件势必会影响植物的水分利用进而影响两者的相互关系. 相对于通过野外测定光合作用和蒸腾作用来获取植物水分利用效率(WUE),植物稳定碳同位素技术的应用有效提高了研究效率,其基本原理在于植物叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值随叶片胞间 CO_2 浓度(c_i)的增大而降低^[4],而 c_i 又与WUE显著相关,可用于指示植物长期水分利用效率^[5,6]. 该技术已成为植物生态学研究的重要工具,广泛应用于不同尺度及各类生态系统植物水分利用研究. 目前,喀斯特石漠化区植物的WUE研究主要涉及植物叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值对石漠化程度、坡位及季节的响应^[7-12],尚未见到石漠化区不同土壤类型对喀斯特植物水分利用的影响研究. 鉴于此,本研究以黔中喀斯特石漠化区典型小流域为对象,通过测定该区不同类型土壤常见种叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值,探讨土壤类型和石漠化等级对植物叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值的影响,具体的研究目标为:①同一小流域内不同土壤类型区植物水分利用效率的差异;②不同土壤类型区植物群落水分利用效率对石漠化程度响应的差异. 旨在加深对喀斯特石漠化区土壤-植被水分关系的理解,为不同土壤类型石漠化生态恢复提供科学依据.

1 材料与方法

1.1 研究区及样地环境概况

试验地设在黔中喀斯特石漠化区清镇市簸箕村王家寨小流域,东经 $106^{\circ}20'5'' \sim 106^{\circ}21'8''$,北纬 $26^{\circ}31'45'' \sim 26^{\circ}30'27''$,面积约 2.4 km^2 ,该区岩性较均匀,为 T_2g 关岭组的灰质白云岩,地貌为典型喀斯特浅碟状峰丛洼地,峰丛与洼地的面积比为 $1.65:1$. 海拔最高点 1451.1 m ,最低点 1275 m ,属亚热带季风湿润气候,年均温 14°C ,极端最低温 -5°C ,极端最高温 35°C ,年总积温 4700°C ,年辐射量 $361.2 \text{ kJ}\cdot\text{cm}^{-2}$,年降雨量 1200 mm ,雨热同季,降雨集中在 $5 \sim 9$ 月,小流域内喀斯特地表渗漏强烈,加上人类的长期破坏造成植被覆盖率较低. 土地利用类型,洼地中以耕地为主,土壤类型为黄壤和水稻土;峰丛以灌木林和草地为主,乔木主要为村寨风水林,土壤类型有黑色石灰土及黄壤,洼地以北的峰丛坡面以黑色石灰土为主,洼地以南的峰丛坡面以黄壤为主. 根据地表植被覆盖率、岩石裸露率的不同,把小流域按石漠化强度不同划分为强度石漠化、中度石漠化、轻度石漠化及无石漠化. 详细的划分标准

见文献[13].

在小流域的东南面,存在非喀斯特土山(简称土山),土层分布相对较厚,土壤类型为黄壤,植被覆盖率相对较高,植被类型为以喜树、过路黄、油茶、杉木为主的灌木灌丛,本研究将土山作为黄壤区石漠化样地的对照样地. 样地设于小流域内不同峰丛坡面上,样地概况及植被情况详见表1,样地分布位置见图1.

1.2 研究区土壤概况

小流域内不同峰丛坡面存在黄壤和黑色石灰土两种土壤类型,由图1和表1可知,在洼地以南的峰丛坡面(样地01、02、03、04、05、06、16、17、18、27、28、29、30、31、32)存在较厚的土层,土厚大于等于 50 cm . 土壤性质与该流域的土山样地的土壤性质相同,均为黄壤. 洼地以北的峰丛坡面(样地07、08、09、10、19、20、21、25、26)土层较浅薄,平均土厚为 30 cm ,为黑色石灰土. 各样地土壤基本理化性质见文献[3],黄壤坡面各样地pH值均小于7,比重大于 $2.5 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$,有机质含量均小于 10% . 黑色石灰

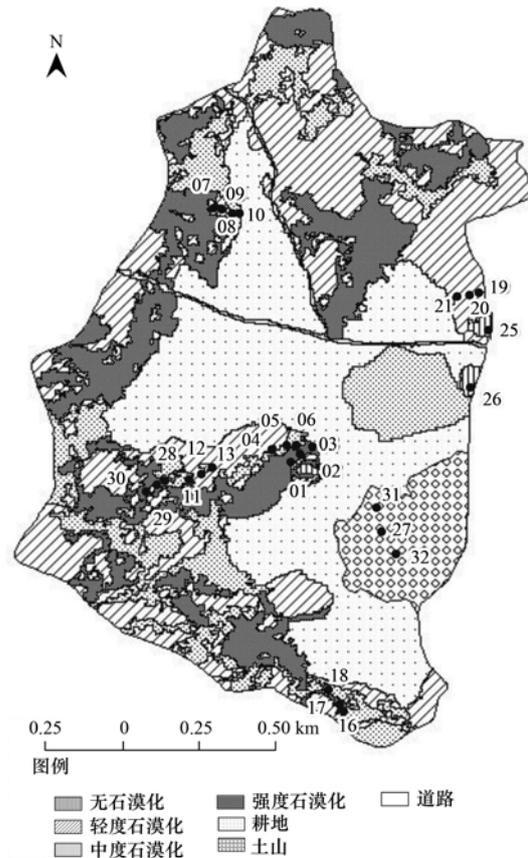


图1 石漠化等级及样地分布示意

Fig. 1 Distribution of the sample plots and the gradation degree of karst rocky desertified land in the study regions

土坡面各样地 pH 值均大于 7, 土壤比重均小于 $2.5 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$, 有机质含量均大于 20%^[3].

1.3 研究方法

1.3.1 样品的采集

供试材料于植物生长季取自小流域不同类型土壤峰丛坡面上, 在强度、中度、轻度石漠化坡面以及土山坡面典型地段随机拉一条从坡顶至坡底的样线, 在每条样线上每隔约 10 m 设置一个约 $5 \text{ m}\times 5 \text{ m}$ 样方, 由于无石漠化坡面高差较小, 样地面积需求较大 ($20 \text{ m}\times 20 \text{ m}$), 无法按坡位变化设置样地, 只在坡面典型位置设置两个样地进行采样. 选择小流域不同土壤类型区常见种火棘、鼠李、竹叶椒、粉枝莓、烟管莢蒾、青蒿为研究对象, 于树冠中上层 4 个方位选择充分伸展的新鲜叶片, 每个植株每个方位采集 3~5 片叶片, 强度、中度、轻度石漠化和土山坡面各样地各植物种所采集的植株数量不低于 3 株, 无石漠化样地各植物种所采集的植株数量不低于 10 株, 采集的叶片装入透气性良好的纸质信封带

回实验室处理. 采样同时在每个样地采集土壤进行含水量测定. 由于浅薄黑色石灰土坡地土层厚度为 30 cm 左右, 为了使两种土壤类型不同土层的土壤含水量更具可比性, 本研究统一按 0~10 cm、10~20 cm、20~30 cm 进行分层采样, 用烘干称重法测定土壤含水量. 强度石漠化、中度石漠化、轻度石漠化样地及对照土山样地 3 个重复. 无石漠化样地 5 个重复.

1.3.2 样品的处理及指标的测定

将样品用蒸馏水洗净, 放置于 70°C 烘箱中恒温烘 48 h, 然后粉碎过 100 目筛, 用 4 分法取约 2 mg 于石英管中, 用一根 Pt 丝作催化剂, 加过量氧化铜 (1 g 以上即可), 真空系统上抽真空 ($< 3 \text{ Pa}$) 并密封, 850°C 烧 2 h 左右, 再上真空系统液氮冷阱纯化 CO_2 , 将收集到的 CO_2 立即上 MAT-252 测试. 所有碳同位素数据均经 PDB 标准化, 单位为‰, 累计误差小于 0.1‰. 所有测试均在环境地球化学国家重点实验室完成.

表 1 研究区样地概况

Table 1 Condition of the plots in study area

等级	样地编号	群落高度 /m	枯落物厚度 /cm	坡位	坡度/ $^\circ$	土壤类型	最大土厚 /cm	植被类型	常见种 ¹⁾
强	01	0.6	0.5	坡顶	16	黄壤	60		
强	02	0.6	0.4	中坡	15	黄壤	60		
强	03	0.6	0.3	下坡	18	黄壤	60	以 a, c, d, e, f, g, k 为主的稀疏灌草丛	a, b, c, d, e, f, g, k, l, m
强	16	0.9	0.9	上坡	35	黄壤	50		
强	17	1.0	0.8	中坡	28	黄壤	50		
强	18	0.9	0.8	下坡	18	黄壤	60		
中	04	1.0	1.2	上坡	18	黄壤	50	以 a, b, c, e, g, j, k 为主的藤刺灌丛	a, b, c, d, e, f, g, j, k, l, m
中	05	1.0	1.3	中上	30	黄壤	50		
中	06	1.2	1.3	中下	25	黄壤	50		
中	07	0.8	1.0	上坡	30	黑色石灰土	40		
中	08	0.8	1.0	中坡	30	黑色石灰土	35	以 d, g, k, l, m 为主的草灌丛	a, b, c, d, e, f, g, l, m
中	09	0.9	1.0	中下	35	黑色石灰土	45		
中	10	1.0	1.0	下坡	25	黑色石灰土	50		
轻	19	3.0	2.3	上坡	19	黑色石灰土	50	以 a, b, c, e, f, g, i, j 为主的灌丛	a, b, c, d, e, f, g, h, l, i, m
轻	20	2.8	2.5	中坡	20	黑色石灰土	50		
轻	21	2.8	2.5	中下	36	黑色石灰土	60		
轻	28	2.8	2.6	下坡	8	黄壤	60		
轻	29	3.0	2.5	中坡	10	黄壤	60	以 a, b, c, g, j, k, n 为主的灌丛	a, b, c, d, e, f, g, h, l, i, m
轻	30	2.9	2.5	上坡	12	黄壤	60		
无	25	16.0	18.0	上坡	40	黑色石灰土	40	以 h, i, a, b 为主的次生林	a, b, c, h, i, m
无	26	16.0	18.0	中坡	33	黑色石灰土	50		
土山	32	8.0	3.0	中坡	5	黄壤	200	以 d, n, o, p 为主的灌木林	a, b, c, d, f, g, l, m
土山	27	8.0	3.0	中坡	5	黄壤	200		
土山	31	8.0	3.0	中坡	5	黄壤	200		

1) a. 鼠李(*Rhamnus davurica*); b. 竹叶椒(*Zanthoxylum planispinum*); c. 烟管莢蒾(*Viburnum utile*); d. 过路黄(*Lysimachia christinae*); e. 小果蔷薇(*Rosa cymosa* trutt); f. 火棘(*Pyraacantha fortuneana*); g. 粉枝莓(*Rubus biflorus*); h. 云贵鹅耳枥(*Carpinus pubescens*); i. 圆果化香(*Platycarya longipes*); j. 月月青(*Itea ilicifolia*); k. 毛轴蕨(*Pteridium revolutum*); l. 青蒿(*Artemisia carvifolia*); m. 莎草(*Cyperus rotundus*); n. 杉木(*Cunninghamia lanceolata*); o. 油茶(*Camellia oleifera*); p. 喜树(*Camptotheca acuminata*)

1.3.3 数据处理与统计

用 Microsoft Excel 2007 进行数据整理,采用 SPSS Statistics 19 进行数据统计分析. 统计分析方法包括描述性统计分析(Descriptive Statistics)、单因素方差分析(One-way ANOVA)、比较均值分析(Compare Means)及相关分析(Correlate)等.

2 结果与分析

2.1 不同土壤类型区土壤含水量特征

研究区黄壤坡面和黑色石灰土坡面各植物群落土壤含水量见图 2,黄壤和黑色石灰土土壤 0~30 cm 含水量均值分别为 37.67% 和 41.11%,黄壤坡面植物群落 0~30 cm 土壤含水量小于黑色石灰土坡面. 方差分析结果显示 0~30 cm 土壤含水量在黄壤和黑色石灰土间差异不显著($P > 0.05$).

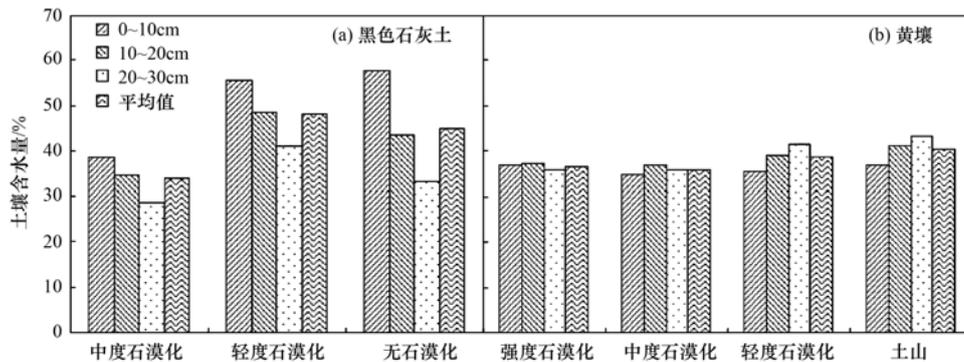


图 2 不同土壤类型坡面各植物群落土壤含水量变化

Fig. 2 Variations in soil water content in different communities of different soils

2.2 不同土壤类型样地常见种叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 及其值其频数分布

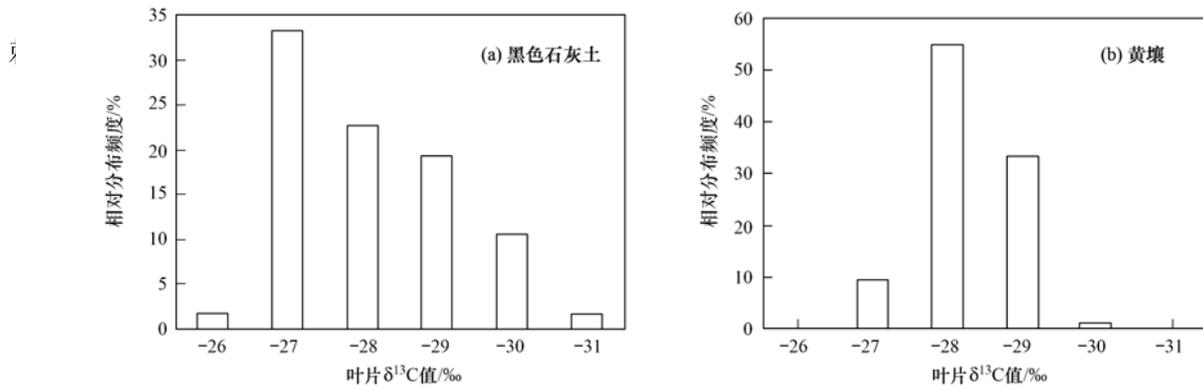
研究区不同土壤类型区域植物叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值见表 2,本次测定标样的分析结果为 -24.9‰ . 黑色石灰土区域植物叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值的变化范围为 $-30.7\text{‰} \sim -26.5\text{‰}$,平均值为 -28.1‰ ,标准差为 1.10,变异系数为 0.039;黄壤变化范围为 $-29.2\text{‰} \sim -26.8\text{‰}$,平均值为 -28.3‰ ,标准差为 0.67,变异系数为 0.024. 不同土壤类型区植物叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 频数分布见图 3,黑色石灰土区植物叶片的 $\delta^{13}\text{C}$ 值 86.0%的数据分布在 $-26.5\text{‰} \sim -29.5\text{‰}$ 之间,分布在 $-25.5\text{‰} \sim -26.5\text{‰}$ 之间和 $-29.5\text{‰} \sim -31.5\text{‰}$ 之间的数据为 1.8% 和 12.2%. 黄壤区植物叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值 88.1%的数据分布在 $-27.5\text{‰} \sim -29.5\text{‰}$ 之间,分布在 $-26.5\text{‰} \sim -27.5\text{‰}$ 之间和 $-29.5\text{‰} \sim -30.5\text{‰}$ 之间的数据为 9.5% 和 1.2%.

由图 2 可知,黄壤坡面各植物群落土壤含水量平均值为土山 > 轻度石漠化 > 强度石漠化 > 中度石漠化,黑色石灰土区域土壤含水量平均值为轻度石漠化 > 无石漠化 > 中度石漠化. 方差分析结果显示,黄壤坡面各植物群落土壤含水量无显著性差异($P > 0.05$),黑色石灰土坡面各石漠化等级植物群落土壤含水量存在显著性差异($P < 0.05$),经多重分析,黑色石灰土中度石漠化和轻度石漠化植物群落土壤含水量存在显著性差异($P < 0.05$).

不同土壤类型土壤含水量剖面分布不同,黄壤剖面土壤含水量基本呈现出上低下高的格局,黑色石灰土剖面土壤含水量则呈现出上高下低的格局. 方差分析结果显示黄壤剖面各层土壤含水量无显著性差异($P > 0.05$),黑色石灰土剖面土壤含水量存在显著差异($P < 0.05$).

在 $-25.5\text{‰} \sim -26.5\text{‰}$ 之间和 $-30.5\text{‰} \sim -31.5\text{‰}$ 之间没有数据分布. 与同流域内黑色石灰土区植物叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值相比,黄壤区植物叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值分布区间较窄,数据相对集中,各植物叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值变异系数较小(图 3、表 2). 其中,粉枝莓、青蒿叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 在黄壤区偏负,火棘在黑色石灰土偏负,鼠李、烟管荚蒾、莎草和竹叶椒在两种类型土壤间差别不大. 方差分析结果表明,研究区不同土壤类型区域植物叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值总体差异不显著($P > 0.05$). 多重比较分析结果表明,除火棘和青蒿在黄壤和黑色石灰土间差异显著外($P < 0.05$),其他种在两种土壤间均不存在显著性差异($P > 0.05$).

由表 2 可知,小流域内不同类型土壤区常见种 $\delta^{13}\text{C}$ 值的顺序不同. 黄壤区各常见种 $\delta^{13}\text{C}$ 值的顺序为烟管荚蒾 > 竹叶椒 > 鼠李、青蒿 > 火棘 > 莎草 > 粉枝莓,黑色石灰土区各常见种 $\delta^{13}\text{C}$ 值的顺序为青蒿

图3 不同土壤类型区植物叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值的频度分布Fig. 3 Frequency distribution of foliar $\delta^{13}\text{C}$ values of plants in different soil types表2 不同土壤类型样地常见种叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 的特征Table 2 Foliar $\delta^{13}\text{C}$ values of common species in different soil types

土壤类型	植物种	样本数	$\delta^{13}\text{C}$ 值(变化范围) /‰	$\delta^{13}\text{C}$ 值[平均 \pm 标准差(mean \pm SD)] /‰	变异系数 (CV)
黄壤	火棘	14	-29.2 ~ -27.6	-28.5 \pm 0.43	0.015
	鼠李	15	-29.8 ~ -26.9	-28.4 \pm 0.65	0.023
	粉枝莓	10	-29.5 ~ -27.3	-28.7 \pm 0.66	0.023
	竹叶椒	14	-29.4 ~ -26.8	-28.3 \pm 0.64	0.023
	烟管荚蒾	9	-28.7 ~ -26.8	-27.5 \pm 0.55	0.020
	莎草	12	-30.1 ~ -27.5	-28.6 \pm 0.73	0.026
	青蒿	10	-29.2 ~ -27.0	-28.4 \pm 0.69	0.024
	总和	84	-30.1 ~ -26.8	-28.3 \pm 0.67	0.024
	黑色石灰土	火棘	7	-29.5 ~ -28.3	-29.1 \pm 0.36
鼠李		9	-29.9 ~ -26.9	-28.5 \pm 0.88	0.031
粉枝莓		7	-29.7 ~ -26.5	-27.5 \pm 1.08	0.039
竹叶椒		9	-30.7 ~ -26.6	-28.2 \pm 1.38	0.049
烟管荚蒾		9	-28.8 ~ -27.0	-27.6 \pm 0.54	0.020
莎草		9	-30.5 ~ -26.6	-28.5 \pm 1.41	0.049
青蒿		7	-28.0 ~ -26.7	-27.4 \pm 0.55	0.020
总和		57	-30.7 ~ -26.5	-28.1 \pm 1.10	0.039

界环境条件有关. 方差分析结果显示黑色石灰土区和黄壤区各常见种 $\delta^{13}\text{C}$ 值种间均存在显著性差异($P < 0.05$),说明喀斯特石漠化区植物可能具有多种水分利用策略. 经多重比较分析,黑色石灰土区青蒿与莎草、鼠李间存在显著性差异($P < 0.05$),火棘与青蒿、烟管荚蒾、粉枝莓间存在显著性差异($P < 0.05$),黄壤区烟管荚蒾与其余6种植物种之间存在显著性差异($P < 0.05$).

2.3 不同土壤类型植物群落 $\delta^{13}\text{C}$ 值对石漠化程度的响应

虽然各石漠化等级植物群落物种组成并不完全一致,但是群落 $\delta^{13}\text{C}$ 均值仍能很好地指示群落水平的水分可利用性^[14]. 不同土壤类型石漠化序列群落 $\delta^{13}\text{C}$ 均值见表3,从中可知,黄壤区域对照(土山)、轻度、中度和强度石漠化常见种植物 $\delta^{13}\text{C}$ 值的变化

范围分别为 $-28.0\text{‰} \sim -30.1\text{‰}$ 、 $-27.0\text{‰} \sim -29.0\text{‰}$ 、 $-26.8\text{‰} \sim -29.3\text{‰}$ 和 $-26.8\text{‰} \sim -29.8\text{‰}$,各植物群落 $\delta^{13}\text{C}$ 均值顺序为土山 < 强度 < 轻度 < 中度,分别是 $-28.7\text{‰} \pm 0.55\text{‰}$ 、 $-28.2\text{‰} \pm 0.66\text{‰}$ 、 $-28.1\text{‰} \pm 0.49\text{‰}$ 和 $-28.0\text{‰} \pm 0.78\text{‰}$. 黑色石灰土区无、轻度和中度石漠化常见种植物 $\delta^{13}\text{C}$ 变化范围分别为 $-26.5\text{‰} \sim -29.7\text{‰}$ 、 $-26.0\text{‰} \sim -29.7\text{‰}$ 和 $-26.5\text{‰} \sim -29.1\text{‰}$,各植物群落 $\delta^{13}\text{C}$ 均值顺序为无 < 轻度 < 中度,分别为 $-29.6\text{‰} \pm 1.16\text{‰}$ 、 $-28.3\text{‰} \pm 0.77\text{‰}$ 和 $-27.5\text{‰} \pm 0.83\text{‰}$. 显示黑色石灰土区植物群落 $\delta^{13}\text{C}$ 均值随石漠化进行趋正,而黄壤区随石漠化呈现出先趋正后趋负的变化格局. 方差分析结果显示黄壤区和黑色石灰土区各植物群落 $\delta^{13}\text{C}$ 值间均存在极显著差异($P < 0.01$),多重比较分析表明,

黄壤区各等级石漠化样地与对照样地存在显著差异 ($P < 0.05$) 或极显著差异 ($P < 0.01$), 而各石漠化植物群落 $\delta^{13}\text{C}$ 值间不存在显著差异 ($P > 0.05$); 浅薄黑色石灰土区各石漠化植物群落 $\delta^{13}\text{C}$ 值间均存在显著 ($P < 0.05$) 或极显著差异 ($P < 0.01$).

由表 3 可知, 中度石漠化植物群落 $\delta^{13}\text{C}$ 值在黄壤

区域较浅薄黑色石灰土坡面偏负, 分别为 $-28.0\% \pm 0.78\%$ 和 $-27.5\% \pm 0.83\%$, 而轻度石漠化植物群落 $\delta^{13}\text{C}$ 值在黄壤区域较浅薄黑色石灰土坡面偏正, 分别为 $-28.1\% \pm 0.49\%$ 和 $-28.3\% \pm 0.77\%$. 方差分析结果显示轻度石漠化和中度石漠化植物群落 $\delta^{13}\text{C}$ 值在不同土壤类型区差异均不显著 ($P > 0.05$).

表 3 不同土壤类型区不同等级石漠化植物群落 $\delta^{13}\text{C}$ 值

Table 3 Foliar $\delta^{13}\text{C}$ values of different karst rocky desertification plots in different soil types

土壤类型	石漠化等级	样本数	$\delta^{13}\text{C}$ 值(变化范围) /‰	$\delta^{13}\text{C}$ 值[平均 \pm 标准差 (mean \pm SD)] /‰	变异系数 (CV)
黄壤	强度石漠化	28	-29.8 ~ -26.8	-28.2 \pm 0.66	0.024
	中度石漠化	17	-29.3 ~ -26.8	-28.0 \pm 0.78	0.028
	轻度石漠化	21	-29.0 ~ -27.0	-28.1 \pm 0.49	0.017
	土山	18	-30.1 ~ -28.0	-28.7 \pm 0.55	0.019
	总和	84	-30.1 ~ -26.8	-28.3 \pm 0.67	0.024
黑色石灰土	中度石漠化	28	-29.1 ~ -26.5	-27.5 \pm 0.83	0.03
	轻度石漠化	21	-29.8 ~ -27.2	-28.3 \pm 0.77	0.027
	无石漠化	8	-29.7 ~ -26.5	-29.6 \pm 1.16	0.039
	总和	57	-30.7 ~ -26.5	-28.1 \pm 1.10	0.039

3 讨论

在高资源(水分、养分)可利用性条件下的植物具有较小的 $\delta^{13}\text{C}$ 值, 即较低的 WUE^[15,16]. 水分是喀斯特地区植物生长的关键限制因子. 由表 2 可知, 小流域黄壤区植物群落土壤含水量平均值小于黑色石灰土区. 黄壤和黑色石灰土土壤 0 ~ 30 cm 含水量均值分别为 37.67% 和 41.11%. 但黄壤区植物叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 均值却偏负于黑色石灰土区(图 2、表 3). 另外, 黄壤区植物叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值分布区间较黑色石灰土区窄, 数据相对集中, 各植物叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值变异系数小于黑色石灰土区(表 3). 这主要跟不同类型土壤水分特征及土层厚度有关. 杜雪莲等^[17] 研究表明该区黑色石灰土土壤含水量变化幅度大于黄壤变化幅度. 雨后石灰土含水量总是高于黄壤含水量, 而连续几天无雨后, 石灰土含水量总是低于黄壤含水量, 显示黑色石灰土保水和持水性能差, 对降雨的缓冲能力弱^[17,18]. 土壤储水能力是植物生长和水分状况的主要限制因素. 土层厚度直接影响土壤的储水能力以及土壤水分的植被承载能力^[19,20], 进而影响植物的生长状况^[20]. 尤其在土层浅薄的山区, 土层厚度成为影响植被生长状况的主要限制因子^[21]. 一般来说, 土壤厚度增加, 植物可利用资源增加, 高资源可利用性条件下植物 $\delta^{13}\text{C}$ 值较小, 即 WUE 较低^[15,16]. 碳酸盐岩的特殊地质背景及成土机制导致土量成为喀斯特地区植物生长的限制因子^[22]. 喀斯特地区土层厚度的增加增强了土壤储存水分、养

分的能力及对其他环境因子的缓冲能力. 喀斯特地区临时性干旱频繁, 小流域内黄壤区较为深厚的土层能提供更加稳定和充足的水分来源. 另外, 本研究区黄壤坡面坡度较缓, 减少了养分水分流失, 也可能提供给植物生长更为充足的水分及养分.

研究区黑色石灰土坡面植物群落 $\delta^{13}\text{C}$ 值随着石漠化的进行逐渐趋正, 说明各植物群落水分利用效率均随着石漠化的进行逐渐提高. 这与之前的研究结果一致^[8~10]. 喀斯特石漠化后环境物理特征及辐射状况的改变, 诱导着各种生态因子发生变化, 并形成一定的环境梯度^[23]. 石漠化过程中, 植被逐渐退化, 光照逐渐增强, 水分逐渐减少, 导致喀斯特土、水环境要素缺损, 植物遭受水分胁迫^[23]. 而黄壤坡面植物群落 $\delta^{13}\text{C}$ 值随石漠化呈现出先趋正后趋负的变化格局. 方差分析结果显示黑色石灰土及黄壤坡面各植物群落 $\delta^{13}\text{C}$ 值均存在极显著差异 ($P < 0.01$). 值得注意的是, 经多重比较分析, 黄壤坡面各石漠化植物群落叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值间均不存在显著差异 ($P > 0.05$), 而黑色石灰土坡面各等级石漠化植物群落叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值间均存在显著 ($P < 0.05$) 或极显著差异 ($P < 0.01$), 说明黄壤坡面植物群落水分利用效率随石漠化进行差别不大, 而黑色石灰土坡面植物群落水分利用效率随石漠化进行显著提高, 显示黑色石灰土坡面植物群落随石漠化进行遭受更为严重的水分胁迫, 这与图 2 所示的研究区不同类型土壤各石漠化植物群落土壤含水量变化格局一致. 方差分析结果表明, 黄壤坡面各植物群落土壤

含水量无显著性差异($P > 0.05$), 黑色石灰土坡面各石漠化等级植物群落土壤含水量存在显著性差异($P < 0.05$). 反映土层较为深厚的黄壤坡面调节水分能力强, 保水性好, 抗外界干扰能力强于浅薄黑色石灰土坡面. 本研究区黑色石灰土养分^[3]、土壤含水量平均值虽较高(图 2), 但黑色石灰土坡面土层浅薄, 储存的养分及水分总量低, 影响植物对水分的利用.

结合研究区不同类型土壤区具体情况, 考虑到研究区不同类型土壤区坡度差异较大, 选取影响植物叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值的主要因子即土壤含水量、土壤有机质、土壤厚度以及坡度与植物叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值进行相关分析, 结果如表 4 所示, 黄壤区植物叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值与土厚、坡度间存在显著性负相关关系($P < 0.01$), 与土壤含水量和土壤有机质间无显著性相关关系($P > 0.05$), 黑色石灰土区植物叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值与土壤含水量间存在显著性负相关关系($P < 0.01$), 与土厚、坡度和土壤有机质间无显著性相关关系($P > 0.05$), 研究区尺度上, 植物叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值与土厚、土壤含水量间存在显著性负相关关系($P < 0.01$), 与坡度和土壤有机质间无显著性相关关系($P > 0.05$). Peñuelas 等^[24]在西班牙东北荒漠流域的研究发现, 位于土层较厚的坡脚处植物 $\delta^{13}\text{C}$ 值较坡顶低. 严昌荣等^[25]在北京东灵山的研究显示, 生长在土层较厚、土壤湿度较高生境下的植物 $\delta^{13}\text{C}$ 值较干旱生境的低一些. Chen 等^[26,27]对中国西北荒漠地区典型流域的研究结果表明, 该区各植物种 $\delta^{13}\text{C}$ 值和不同群落 C3 植物叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 均值均随土壤含水量的提高显著降低($P < 0.05$). 杜雪莲等^[12]对喀斯特石漠化区小生境的研究结果显示生长于土层较厚的土面生境植物 $\delta^{13}\text{C}$ 值显著低于其他小生境($P < 0.05$). 曹生奎等^[28]在黑河流域下游的研究显示随着土壤含水量逐渐下降, 地下水埋深逐渐加深, 胡杨逐渐提高了其水分利用效率. 王云霓等^[29]对华北落叶松和沙棘的研究表明旱季同一树种在半干旱区树木叶片的 $\delta^{13}\text{C}$ 值要大于半湿润区. 王林等^[30]在华北石质山区的研究结果表明, 随着土层变薄, 土壤含水量下降, 刺槐叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 显著增高($P < 0.05$).

综上, 小流域黄壤区植物叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值的主要影响因子为土厚和坡度, 而影响黑色石灰土区植物叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值的主要因子是土壤含水量. 研究区尺度上, 影响植被 $\delta^{13}\text{C}$ 值的主要环境因子为土壤含水量和土层厚度. 总体上, 研究区土壤对植被 $\delta^{13}\text{C}$ 值的影响是通过调节土壤水分实现的.

表 4 研究区及不同土壤类型区植物叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值与主要环境因子的相关性¹⁾

Table 4 Correlations between foliar $\delta^{13}\text{C}$ values of Common plants and basic environmental factors

环境因子	$\delta^{13}\text{C}$ 值		
	黄壤区	黑色石灰土区	研究区
土壤含水量	-0.13	-0.52 **	-0.31 **
土厚	-0.37 **	-0.17	-0.24 **
坡度	-0.30 **	-0.16	0.11
土壤有机质	0.08	-0.25	0.06

1) * 表示 $P \leq 0.05$, ** 表示 $P \leq 0.01$

4 结论

研究区植物叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值在不同土壤类型间差异不显著($P > 0.05$), 但黄壤区植物叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值分布相对集中, 各植物叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值变异系数较小, 整体较黑色石灰土区偏负. 小流域内黑色石灰土区植物群落 $\delta^{13}\text{C}$ 均值随石漠化进行趋正, 而黄壤区随石漠化呈现出先趋正后趋负的变化格局. 经多重比较分析, 黄壤区各石漠化植物群落 $\delta^{13}\text{C}$ 值间不存在显著差异($P > 0.05$), 黑色石灰土区各石漠化植物群落 $\delta^{13}\text{C}$ 值间均存在显著($P < 0.05$)或极显著差异($P < 0.01$). 相关分析结果表明不同土壤类型区植物叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值的主要影响因子不同, 黄壤区植物叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值的主要影响因子为土厚和坡度, 影响黑色石灰土区植物叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值的主要因子是土壤含水量. 研究区尺度上, 影响植被 $\delta^{13}\text{C}$ 值的主要影响因子为土壤含水量和土层厚度, 总体上, 研究区土壤对植被 $\delta^{13}\text{C}$ 值的影响是通过调节土壤水分实现的.

参考文献:

- [1] 王世杰. 喀斯特石漠化概念演绎及其科学内涵的探讨[J]. 中国岩溶, 2002, 21(2): 101-105.
- [2] 王世杰. 喀斯特石漠化——中国西南最严重的生态地质环境问题[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2003, 22(2): 120-126.
- [3] 罗绪强, 王世杰, 王程媛, 等. 喀斯特石漠化过程中土壤氮同位素组成及其空间分异特征[J]. 核农学报, 2011, 25(6): 1235-1243.
- [4] 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[J]. Australian Journal of Plant Physiology, 1982, 9(2): 121-137.
- [5] 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(1): 503-537.
- [6] Ehleringer J R. Carbon and water relations in desert plants: an isotopic perspective [A]. In: Ehleringer J R, Hall A E, Farquhar G D, et al. Stable isotopes and plant carbon-water

- relations[C]. San Diego: Academic Press, 1993. 155-172.
- [7] 杜雪莲. 喀斯特石漠化区植物水分利用的时空变化研究——以贵州清镇王家寨小流域为例[D]. 贵阳: 中国科学院地球化学研究所, 2008.
- [8] 容丽, 王世杰, 杜雪莲. 贵州花江峡谷区常见乔灌植物叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值对喀斯特石漠化程度的响应[J]. 林业科学, 2007, **43**(6): 38-44.
- [9] 容丽, 王世杰, 杜雪莲. 喀斯特峡谷区常见植物叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值与环境因子的关系研究[J]. 环境科学, 2008, **29**(10): 2285-2293.
- [10] 杜雪莲, 王世杰, 葛永罡, 等. 喀斯特石漠化过程的植物叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值变化及其环境分析[J]. 自然科学进展, 2008, **18**(4): 413-423.
- [11] 杜雪莲, 王世杰. 喀斯特高原区5种常见灌木叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值的季节变化及其对石漠化程度的响应[J]. 地球与环境, 2010, **38**(2): 129-137.
- [12] 杜雪莲, 王世杰, 容丽. 喀斯特石漠化区不同小生境常见灌木种叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值特征[J]. 应用生态学报, 2011, **22**(12): 3094-3100.
- [13] 周梦维, 王世杰, 李阳兵. 典型喀斯特石漠化小流域景观格局的空间因子分析——以贵州清镇王家寨小流域为例[J]. 地理研究, 2007, **26**(5): 897-905.
- [14] 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.
- [15] Schuster W S F, Sandquist D R, Philips S L, *et al.* Comparisons of carbon isotope discrimination in populations of arid land plant species differing in lifespan[J]. Oecologia, 1992, **91**(3): 332-337.
- [16] Ehleringer J B. Gas-exchange implications of isotopic variation in arid-land plants[A]. In: Smith J A C, Griffiths H E D S. Water deficits-plant responses From cell to community[C]. Oxford: Bios Scientific Publishers, 1993. 265-284.
- [17] 杜雪莲, 王世杰. 喀斯特高原区土壤水分的时空变异分析——以贵州清镇王家寨小流域为例[J]. 地球与环境, 2008, **36**(3): 193-201.
- [18] 朱守谦, 韦小丽, 祝小科, 等. 乌江流域喀斯特石质山地水分特征研究[A]. 见: 朱守谦. 喀斯特森林生态研究(III)[C]. 贵阳: 贵州科技出版社, 2002. 30-37.
- [19] Buttle J M, Dillon P J, Eerkes G R. Hydrologic coupling of slopes, riparian zones and streams; an example from the Canadian Shield[J]. Journal of Hydrology, 2004, **287**(1-4): 161-177.
- [20] Schenk H J. Soil depth, plant rooting strategies and species' niches[J]. New Phytologist, 2008, **178**(2): 223-225.
- [21] Querejeta J I, Estrada-Medina H, Allen M F, *et al.* Water source partitioning among trees growing on shallow karst soils in a seasonally dry tropical climate[J]. Oecologia, 2007, **152**(1): 26-36.
- [22] 黎廷宇, 王世杰, 郑乐平. 黔中碳酸盐岩和非碳酸盐岩上覆土壤 CO_2 来源的对比研究[J]. 中国科学(D辑), 2001, **31**(9): 777-782.
- [23] 容丽, 王世杰, 杜雪莲. 喀斯特低热河谷石漠化区环境梯度的小气候效应[J]. 生态学杂志, 2006, **25**(9): 1038-1043.
- [24] Peñuelas J, Filella I, Terradas J. Variability of plant nitrogen and water use in a 100-m transect of a subdesertic depression of the Ebro valley (Spain) characterized by leaf $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{15}\text{N}$ [J]. Acta Oecologica, 1999, **20**(2): 119-123.
- [25] 严昌荣, 韩兴国, 陈灵芝, 等. 暖温带落叶阔叶林主要植物叶片中 $\delta^{13}\text{C}$ 值的种间差异及时空变化[J]. 植物学报, 1998, **40**(9): 853-859.
- [26] Chen S P, Bai Y F, Lin G H, *et al.* Isotopic carbon composition and related characters of dominant species along an environmental gradient in Inner Mongolia, China [J]. Journal of Arid Environments, 2007, **71**(1): 12-28.
- [27] Chen S P, Bai Y F, Lin G H, *et al.* Variations in $\delta^{13}\text{C}$ values among major plant community types in the Xilin River Basin, Inner Mongolia, China[J]. Australian Journal of Botany, 2007, **55**(1): 48-54.
- [28] 曹生奎, 冯起, 司建华, 等. 不同立地条件下胡杨叶片稳定碳同位素组成及水分利用效率的变化[J]. 冰川冻土, 2012, **34**(1): 155-160.
- [29] 王云霓, 熊伟, 王彦辉, 等. 六盘山主要树种叶片稳定性碳同位素组成的时空变化特征[J]. 水土保持研究, 2012, **19**(3): 42-47.
- [30] 王林, 冯锦霞, 万贤崇. 土层厚度对刺槐旱季水分状况和生长的影响[J]. 植物生态学报, 2013, **37**(3): 248-255.

CONTENTS

Comparative Analysis Methods of Haze Distinction over Yangtze River Delta Region	LIU Xiao-hui, ZHU Bin, GAO Jin-hui, <i>et al.</i>	(3239)
Trends of Urban Haze in Jiangsu Province China over the Past 33 Years	LIU Duan-yang, WEI Jian-su, YAN Wen-lian, <i>et al.</i>	(3247)
Temporal Variation of Background Atmospheric CO ₂ and CH ₄ at Mount Waliguan, China	LIU Peng, ZHANG Guo-qing, WANG Jian-qiong, <i>et al.</i>	(3256)
Characteristics and Sources of Organic Carbon and Elemental Carbon in PM _{2.5} in Shanghai Urban Area	ZHANG Yi-hua, WANG Dong-fang, ZHAO Qian-biao, <i>et al.</i>	(3263)
Size Distribution and Characterization of OC and EC in Atmospheric Aerosols During the Asian Youth Games of Nanjing, China	WANG Hong-lei, ZHU Bin, AN Jun-lin, <i>et al.</i>	(3271)
Pollution Characteristics of Carbonaceous Aerosols in PM _{2.5} During Typical Winter Days in Wuxi City	YUN Long-long, LU Fan, ZHANG Tian-shu, <i>et al.</i>	(3280)
Emission Characteristics of PM _{2.5} from Blast Furnace Iron Making	FAN Zhen-zhen, ZHAO Ya-li, ZHAO Hao-ning, <i>et al.</i>	(3287)
Composition Characteristics of Atmospheric Volatile Organic Compounds in the Urban Area of Beibei District, Chongqing	QI Xin, HAO Qing-ju, JI Dong-sheng, <i>et al.</i>	(3293)
Catalytic Oxidation of Two-component VOCs and Kinetic Analysis	BO Long-li, YANG Li, SUN Jian-yu, <i>et al.</i>	(3302)
Ultrafine Particle Number Concentration and Size Distribution of Vehicle Exhaust Ultrafine Particles	LU Ye-qiang, CHEN Qiu-fang, SUN Zai, <i>et al.</i>	(3309)
Major Ion Chemistry of Surface Water in the Upper Reach of Shule River Basin and the Possible Controls	ZHOU Jia-xin, DING Yong-jian, ZENG Guo-xiong, <i>et al.</i>	(3315)
Sediment-water Flux and Processes of Nutrients and Gaseous Nitrogen Release in a China River Reservoir	CHEN Zhu-hong, CHEN Neng-wang, WU Yin-qi, <i>et al.</i>	(3325)
Spatial Distribution and Pollution Assessment of Heavy Metals in the Tidal Reach and Its Adjacent Sea Estuary of Daliaohe Area, China	ZHANG Lei, QIN Yan-wen, MA Ying-qun, <i>et al.</i>	(3336)
Chemical Speciation and Risk Assessment of Heavy Metals in the Middle Part of Yarlung Zangbo Surface Sediments	BAI Jian-kun, LI Chao-liu, KANG Shi-chang, <i>et al.</i>	(3346)
Analysis of Particle Size Characteristics of Road Sediments in Beijing Olympic Park	LI Hai-yan, SHI An-bang, QU Yang-sheng, <i>et al.</i>	(3352)
Levels and Distribution of the Dioxin-Like Polychlorinated Biphenyls (PCBs) in the Surface Sediment of the Yellow River	LI Guang-yao, JIN Jun, HE Chang, <i>et al.</i>	(3358)
Characteristics of Nitrogen and Phosphorus Retention in Two Different Channel Forms in a Typical Headwater Stream in the Suburb of Hefei City, China	LI Ru-zhong, YANG Ji-wei, QIAN Jing, <i>et al.</i>	(3365)
Migration and Transformation of Nitrogen in Urban Stream Located in Plain River-net Area Based on Water Resources Regulation	LIU Bo, SHENG Ming, ZHU Qiang, <i>et al.</i>	(3373)
Decomposition and Phosphorus Dynamics of the Litters in Standing and Litterbag of the Hangzhou Bay Coastal Wetland	SHAO Xue-xin, LIANG Xin-qiang, WU Ming, <i>et al.</i>	(3381)
Muti-model Collaborative Retrieval of Chlorophyll a in Taihu Lake Based on Data Assimilation	LI Yuan, LI Yun-mei, LÜ Heng, <i>et al.</i>	(3389)
Photobleaching of Dissolved Organic Matter (DOM) from Confluence of Two Rivers Under Natural Solar Radiation; A Case Study of Fujiang River-Jialingjiang River	GAO Jie, JIANG Tao, YAN Jin-long, <i>et al.</i>	(3397)
Using Ultraviolet-Visible (UV-Vis) Absorption Spectrum to Estimate the Dissolved Organic Matter (DOM) Concentration in Water, Soils and Sediments of Typical Water-Level Fluctuation Zones of the Three Gorges Reservoir Areas	LI Lu-lu, JIANG Tao, LU Song, <i>et al.</i>	(3408)
Synthesis of Cu ₂ O-Ag-AgBr/MA Visible Photocatalyst and Its Performance in Degradation of 2-Chlorophenol	WANG Ran, ZHOU Xue-feng, HU Xue-xiang, <i>et al.</i>	(3417)
Effects of Particle Size of Zero-Valent Iron on the Reactivity of Activating Persulfate and Kinetics for the Degradation of Acid Orange 7	LI Huan-xuan, WAN Jin-quan, MA Yong-wen, <i>et al.</i>	(3422)
Degradation of 2,4-D by Combined Catalytic Dechlorination and Biological Oxidation	ZHOU Hong-yi, ZENG Si-si, LIANG Si, <i>et al.</i>	(3430)
Treatment of Marine-Aquaculture Effluent by the Multi-Soil-Layer (MSL) System and Subsurface Flow Constructed Wetland	SONG Ying, HUANG Yu-ting, GE Chuan, <i>et al.</i>	(3436)
Variation of Different Carbon Sources in the Sewage Treatment Process	JIN Peng-kang, CHANG Jin, WANG Xian-bao, <i>et al.</i>	(3443)
Effect of Gas-lift Device on Nitrogen Removal Efficiency of ANAMMOX Reactor	LI Xiang, ZHANG Da-lin, HUANG Yong, <i>et al.</i>	(3449)
Enhancement for Anaerobic Digestion of Sewage Sludge Pretreated by Microwave and Its Combined Processes	LIU Ji-bao, NI Xiao-tang, WEI Yuan-song, <i>et al.</i>	(3455)
Pilot Study of Thermal Treatment/Thermophilic Anaerobic Digestion Process Treating Waste Activated Sludge of High Solid Content	WU Jing, WANG Guang-qi, CAO Zhi-ping, <i>et al.</i>	(3461)
Effects of Temperature on Combined Process of ABR and MBR for Domestic Sewage Treatment and Analysis of Microbial Community	WU Peng, LU Shuang-jun, XU Yue-zhong, <i>et al.</i>	(3466)
Microbial Community of Municipal Discharges in A Sewage Treatment Plant	XU Ai-ling, REN Jie, SONG Zhi-wen, <i>et al.</i>	(3473)
Pilot-Scale Cultivation of <i>Spirulina plantensis</i> with Digested Piggery Wastewater	GUO Qing-qing, LIU Rui, LUO Jin-fei, <i>et al.</i>	(3480)
Spectral Characteristics of Soluble Metabolites During Endogenous Respiration	LI Zhi-hua, ZHANG Qin, BAI Xu-li, <i>et al.</i>	(3487)
Endogenous Respiration Process Analysis of Heterotrophic Biomass and Autotrophic Biomass Based on Respiration Map	LI Zhi-hua, BAI Xu-li, ZHANG Qin, <i>et al.</i>	(3492)
Influence of S-Metolachlor and Cd ²⁺ on Photosynthesis of <i>Scenedesmus obliquus</i>	CHEN Cai-dong, HU Xiao-na, ZHANG Xiao-qiang, <i>et al.</i>	(3498)
Effect of Environmental Factors on Fish Community Structure in the Huntai River Basin at Multiple Scales	LI Yan-li, LI Yan-fen, XU Zong-xue	(3504)
Succession of Rotifer Community and Its Relationship with Environmental Factors in a New Estuarial Landscape River, Shanghai	MA Wen-hua, ZHANG Wei, GU Wan-wen, <i>et al.</i>	(3513)
Anaerobic Reduction of Humus/Fe(III) and Electron Transport Mechanism of <i>Fontibacter</i> sp. SgZ-2	MA Chen, YANG Gui-qin, LU Qin, <i>et al.</i>	(3522)
Source Apportionment of Soil Heavy Metals in Jiapigou Goldmine Based on the UNMIX Model	AI Jian-chao, WANG Ning, YANG Jing	(3530)
Environmental Magnetic Properties and Their Spatial Variability of Topsoil in Shihezi City	YANG Han, XIONG Hei-gang, CHEN Xue-gang	(3537)
Effects of Different Amounts of Phosphate Fertilizers on Copper, Zinc Transfer in Red Soil Under the Application of KH ₂ PO ₄	GUO Liang, LI Zhong-wu, HUANG Bin, <i>et al.</i>	(3546)
Influence of Sulfur on the Bioavailability of Arsenic Uptake by Rice (<i>Oryza sativa</i> L.) and Its Speciation in Soil	YANG Shi-jie, TANG Bing-pei, WANG Dai-chang, <i>et al.</i>	(3553)
Effects of Sulfur on Transformation of Selenium in Soil and Uptake of Selenium in Rape	LIU Xin-wei, DUAN Bi-hui, XIA Quan-jie, <i>et al.</i>	(3564)
Impact of Reclaimed Water Irrigation on Soil Chemical Properties and Culturable Microorganisms	GONG Xue, WANG Ji-hua, GUAN Jian-fei, <i>et al.</i>	(3572)
Influence of Different Slope Position and Profile in <i>Disporopsis pernyi</i> Forest Land on Soil Microbial Biomass and Enzyme Activity in Southwest Karst Mountain of China	QIN Hua-Jun, HE Bing-Hui, ZHAO Xuan-chi, <i>et al.</i>	(3580)
Effects of Different Soil Types on the Foliar δ ¹³ C Values of Common Local Plant Species in Karst Rocky Desertification Area in Central Guizhou Province	DU Xue-lian, WANG Shi-jie, LUO Xu-qiang	(3587)
Effect of Carbon Substrate Concentration on N ₂ , N ₂ O, NO, CO ₂ and CH ₄ Emissions from a Paddy Soil in Anaerobic Condition	CHEN Nuo, LIAO Ting-ting, WANG Rui, <i>et al.</i>	(3595)
Ability of Typical Greenery Shrubs of Beijing to Adsorb and Arrest PM _{2.5}	LIANG Dan, WANG Bin, WANG Yun-qi, <i>et al.</i>	(3605)
Effects of Chlorides on Cd Transformation in a Simulated Grate Incinerator During Sludge Incineration Process	LIU Jing-yong, ZHUO Zhong-xu, SUN Shui-yu, <i>et al.</i>	(3612)
Spatial Temporal Differentiation of Product-based and Consumption-based CO ₂ Emissions and Balance in the Beijing-Tianjin-Hebei Region; an Economic Input-Output Analysis	WANG Hao, CHEN Cao-cao, PAN Tao, <i>et al.</i>	(3619)
Study on Feasible Emission Control Level of Air Pollutions for Cement Industry	REN Chun, JIANG Mei, ZOU Lan, <i>et al.</i>	(3632)

《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 欧阳自远

副主编: 赵景柱 郝吉明 田 刚

编 委: (按姓氏笔画排序)

万国江 王华聪 王凯军 王绪绪 田 刚 田 静 史培军
朱永官 刘志培 汤鸿霄 陈吉宁 孟 伟 周宗灿 林金明
欧阳自远 赵景柱 姜 林 郝郑平 郝吉明 聂永丰 黄 霞
黄 耀 鲍 强 潘 纲 潘 涛 魏复盛

环 境 科 学

(HUANJING KEXUE)

(月刊 1976年8月创刊)

2014年9月15日 第35卷 第9期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 35 No. 9 Sep. 15, 2014

主 管	中国科学院	Superintended	by	Chinese Academy of Sciences
主 办	中国科学院生态环境研究中心	Sponsored	by	Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences
协 办	(以参加先后为序) 北京市环境保护科学研究院 清华大学环境学院	Co-Sponsored	by	Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection School of Environment, Tsinghua University
主 编	欧阳自远	Editor-in -Chief		OUYANG Zi-yuan
编 辑	《环境科学》编辑委员会 北京市 2871 信箱(海淀区双清路 18 号, 邮政编码: 100085) 电话: 010-62941102, 010-62849343 传真: 010-62849343 E-mail: hjkx@reces. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn	Edited	by	The Editorial Board of Environmental Science (HUANJING KEXUE) P. O. Box 2871, Beijing 100085, China Tel: 010-62941102, 010-62849343; Fax: 010-62849343 E-mail: hjkx@reces. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn
出 版	科 学 出 版 社 北京东黄城根北街 16 号 邮政编码: 100717	Published	by	Science Press 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷 装 订	北京北林印刷厂	Printed	by	Beijing Bei Lin Printing House
发 行	科 学 出 版 社 电话: 010-64017032 E-mail: journal@mail. sciencep. com	Distributed	by	Science Press Tel: 010-64017032 E-mail: journal@mail. sciencep. com
订 购 处	全国各地邮电局	Domestic		All Local Post Offices in China
国外总发行	中国国际图书贸易总公司 (北京 399 信箱)	Foreign		China International Book Trading Corporation (Guoji Shudian), P. O. Box 399, Beijing 100044, China

中国标准刊号: ISSN 0250-3301
CN 11-1895/X

国内邮发代号: 2-821

国内定价: 90.00 元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行