

ISSN 1000-0933

CN 11-2031/Q

生态学报

Acta Ecologica Sinica



第34卷 第6期 Vol.34 No.6 **2014**

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 34 卷 第 6 期 2014 年 3 月 (半月刊)

目 次

前沿理论与学科综述

- 全球气候变暖对凋落物分解的影响..... 宋 飘,张乃莉,马克平,等 (1327)
- 从系统到景观:区域物质流分析的景观取向 张晓刚,曾 辉 (1340)
- 论湿地生态系统服务的多维度价值评估方法..... 宋豫秦,张晓蕾 (1352)
- 保幼激素在昆虫中的分子作用机理..... 金敏娜,林欣大 (1361)
- 岩画和壁画类文物微生物病害研究进展..... 李 强,葛琴雅,潘晓轩,等 (1371)
- 基于 3S 技术的图们江流域湿地生态安全评价与预警研究 朱卫红,苗承玉,郑小军,等 (1379)
- 跨界保护区网络构建研究进展..... 王 伟,田 瑜,常 明,等 (1391)

个体与基础生态

- 速生树种尾巨桉和竹柳幼苗耗水特性和水分利用效率..... 邱 权,潘 昕,李吉跃,等 (1401)
- 三种增温情景对入侵植物空心莲子草形态可塑性的影响..... 褚延梅,杨 健,李景吉,等 (1411)
- 气象要素及土壤理化性质对不同土地利用方式下冬夏岩溶作用的影响 刘 文,张 强,贾亚男 (1418)
- 施用纳米碳对烤烟氮素吸收和利用的影响..... 梁太波,尹启生,张艳玲,等 (1429)
- 基于 Voronoi 图的林分空间模型及分布格局研究 刘 帅,吴舒辞,王 红,等 (1436)
- 近自然毛竹林空间结构动态变化..... 仇建习,汤孟平,沈利芬,等 (1444)
- 基于种实性状的无患子天然群体表型多样性研究..... 刁松峰,邵文豪,姜景民,等 (1451)
- 不同林分起源的相容性生物量模型构建..... 符利勇,雷渊才,孙 伟,等 (1461)

种群、群落和生态系统

- 毛竹材用林林下植被群落结构对多花黄精生长的影响..... 樊艳荣,陈双林,杨清平,等 (1471)
- 温度和 CO₂ 浓度升高下转 *Bt* 水稻种植对土壤活性碳氮和线虫群落的短期影响
..... 陈 婧,陈法军,刘满强,等 (1481)
- 中国东北地区近 50 年净生态系统生产力的时空动态 李 洁,张远东,顾峰雪,等 (1490)
- 遥感与 GIS 支持下的盘锦湿地水禽栖息地适宜性评价..... 董张玉,刘殿伟,王宗明,等 (1503)
- 秦岭火地塘林区土壤大孔隙分布特征及对导水性能的影响..... 陆 斌,张胜利,李 侃,等 (1512)
- 磷浓度对铜绿微囊藻、大型溞和金鱼藻三者相互作用的影响..... 马剑敏靳 萍,郭 萌,等 (1520)
- 普生轮藻浸提液对两种淡水藻类的化感抑制作用及其数学模型..... 何宗祥,刘 璐,李 诚,等 (1527)
- 北京永定河-海河干流河岸带植物的区系分析 修 晨,欧阳志云,郑 华 (1535)
- 基于河流生境调查的东河河流生境评价..... 王 强,袁兴中,刘 红,等 (1548)

景观、区域和全球生态

应用 SWAT 模型研究潮河流域土地利用和气候变化对径流的影响 郭军庭,张志强,王盛萍,等 (1559)

长白山不同海拔树木生长对气候变化的响应差异..... 陈 力,尹云鹤,赵东升,等 (1568)

石家庄市空气花粉散布规律及与气候因子的关系..... 李 英,李月丛,吕素青,等 (1575)

不同放牧梯度下呼伦贝尔草甸草原土壤碳氮变化及固碳效应..... 闫瑞瑞,辛晓平,王 旭,等 (1587)

南四湖区农田土壤有机质和微量元素空间分布特征及影响因素..... 武 婕,李玉环,李增兵,等 (1596)

资源与产业生态

跨国土地利用及其生态影响 陆小璇 (1606)

期刊基本参数:CN 11-2031/Q * 1981 * m * 16 * 288 * zh * P * ¥ 90.00 * 1510 * 30 * 2014-03



封面图说: 图们江河流中段——图们江位于吉林省东南边境,发源于长白山东南部的石乙水,河流的绝大部分是中国与朝鲜的界河,下游很小一段为俄罗斯与朝鲜的界河,并由这里流入日本海,我国珲春距离日本海最近的地方仅有 15km。图们江是我国重要的国际性河流之一,随着我国经济的迅速崛起,图们江地区进入到多国合作联合开发阶段,湿地生态系统处于中度预警状态,并有向重度预警发展的趋势,生态安全面临的威胁越来越严重。对该区域进行湿地生态安全评价与预警研究,可为图们江流域生态环境的可持续发展提供依据。图中河道的远方为朝鲜、河道近方为中国。

彩图及图说提供: 陈建伟教授 北京林业大学 E-mail: cites.chenjw@ 163.com

DOI: 10.5846/stxb201306171718

刘文, 张强, 贾亚男. 气象要素及土壤理化性质对不同土地利用方式下冬夏岩溶作用的影响. 生态学报, 2014, 34(6): 1418-1428.

Liu W, Zhang Q, Jia Y N. The influence of meteorological factors and soil physicochemical properties on karst processes in six land-use patterns in summer and winter in a typical karst valley. Acta Ecologica Sinica, 2014, 34(6): 1418-1428.

气象要素及土壤理化性质对不同土地利用方式下冬夏岩溶作用的影响

刘 文^{1,2,3}, 张 强³, 贾亚男^{1,2,*}

(1. 西南大学地理科学学院, 三峡库区生态环境教育部重点实验室, 重庆 400715;

2. 国土资源部岩溶生态环境-重庆南川野外基地, 重庆 408435;

3. 中国地质科学院岩溶地质研究所, 联合国教科文组织国际岩溶研究中心, 国土资源部/广西岩溶动力学重点实验室, 桂林 541004)

摘要:为揭示岩溶作用对不同人类活动强度土地利用方式、季节变化的响应,在重庆青木关岩溶槽谷区选取地质背景相同的 6 种典型土地利用方式(旱地,水田,退耕林,荒草地,杉竹混交林,竹林),利用标准溶蚀试片法得到各样点冬、夏两季单位面积溶蚀数据。并用自动气象站降水、气温,各样点土壤水、土壤 CO₂、土壤有机质、土壤 pH、土壤容重、土壤孔隙度等数据对溶蚀结果进行分析。结果是:(1),夏季各样点壤中平均溶蚀量为冬季的 3.87 倍,且最大溶蚀量从夏季-80cm 处上升为冬季-20—-50cm 处;(2),受人类活动影响强度大的旱地、水田溶蚀量大于人类活动强度逐渐削弱的退耕林、旱地,而受人类活动影响最小的山竹混交林、竹林溶蚀量最小。且在人类活动强度较大的夏季三者之间差值较大。分析认为:水分、热量与溶蚀的季节变动存较好正相关关系,是影响溶蚀的最基础因素;土壤 CO₂在降水量大的夏季才能更好地促进溶蚀;土壤有机质与土壤 pH 反相关,二者协同影响溶蚀,在有机质含量高、pH 偏低的表层对溶蚀影响大,其它层位影响较小;土壤容重、土壤孔隙度反映的土壤质地对溶蚀的影响是双向的,偏黏土持水性好而渗透性差,可促进降水少的冬季的溶蚀,如荒草地;砂土则渗透性好而持水性差,对降水多的夏季溶蚀有利,如旱地。另外,农业活动中用到的农家肥、化肥含 NO₃⁻、SO₄²⁻,也会促进溶蚀。研究成果可为更科学准确地评估岩溶碳汇效应提供参考。

关键词:人类活动;土地利用;降水;气温;土壤;岩溶作用

The influence of meteorological factors and soil physicochemical properties on karst processes in six land-use patterns in summer and winter in a typical karst valley

LIU Wen^{1,2,3}, ZHANG Qiang³, JIA Yanan^{1,2,*}

1 School of Geographical Sciences, Southwest University; Key Laboratory of Eco-environments in Three Gorges Reservoir Region, Ministry of Education, Chongqing 400715, China

2 Field Scientific Observation & Research Base of Karst Eco-environments at Nanchuan in Chongqing, Ministry of Land and Resources of China, Chongqing, 408435, China

3 Institute of Karst Geology, Chinese Academy of Geological Sciences; Karst Dynamics Laboratory, Ministry of Land and Resources/Guangxi; International Research Center on Karst Under the Auspices of UNESCO, Guilin 541004, China

Abstract: Many studies showed that the carbon sink resulted from karst process is fast and stable, which compose the very important part of “Missing carbon sink”. Different land-use patterns can affect the karst process by influence the soil

基金项目:国家自然科学基金资助项目(41101036, 41202184);中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(XDJK2014D002);中国地质调查局地质调查项目资助项目(12120113006700);重庆市基础与前沿研究计划院士专项资助项目(cstc2013jcyjys20001)

收稿日期:2013-06-17; 修订日期:2013-11-07

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: jiayanan@swu.edu.cn

properties. Commonly, with the land-use change from forest land to cultivated field the soil organic matter will reduce, the stability of soil structure get worse, the soil moisture retaining quality get down and the quantity of soil microbiology will diminish, all the above would affect the karst process.

This study took 6 different land-use patterns (Tilled land (code: Ha), Paddy field (St), Reforested land (Tu), Abandoned Land (Hu), Mixed Woodland with Chinese fir-bamboo (Sz) and Bamboo land (Zh)) with the same geological backgrounds but different human influence intensity in Qingmuguan karst valley as a case study to determine the influence factors on karst processes. Standard limestone tablets were buried in the field to test the dissolution process rate. HOBO automatic weather station was located in the roof of local people's house to get the precipitation and temperature data. CO₂ content in different soil layers were tested by Gas-Tec CO₂ tester. Soil samples in different layers were taken back to laboratory to detect the pH value, the organic matter, soil moisture content, and soil bulk density.

The dissolution data from tablets showed that, firstly, the mean dissolution mass per unit area of different land-use patterns in different layers in Summer were 3.87 times than in Winter. The max mean dissolution mass changed from -80cm layer in Summer to -20—-50cm layers in Winter. Secondly, the mean dissolution mass in these two land-use patterns Ha and St with strong human influence intensity (Abbr. HII) was higher than that in Tu and Hu in which the HII get weaker, while that in Sz and Zh which had the weakest HII with the lowest mean dissolution mass. Also, the range between them was higher in summer with strong HII than that in winter.

After analyzing the temperature (T), precipitation (P) and the soil physicochemical properties data, we can find that, there was a positive correlation between the change of dissolution mass with seasons and T, P which were the most important factors affecting the former. The soil CO₂ content can only play an important role on dissolution in summer which has more precipitation, and these two factors can react each other enough to form more carbonic acid so more carbonate tablets can be dissolved. There was a negative correlation between soil organic matter and soil pH, and these two factors affected the dissolution jointly. They can influence dissolution greatest only in surface layer with high organic matter and low pH, while less in deeper layers. The influence of soil texture determined by soil bulk density and soil porosity on dissolution was bidirectional. The clay with good moisture retaining quality but bad permeability was benefit for the dissolution in winter for there was less precipitation that time, but bad in summer for there was no so much water pass through the soil, Hu was a good example of this. However, there was an oppose process in sandy soil with good permeability but bad moisture retaining quality, corresponded more dissolution in summer and less in winter, there was a good example of tilled land also. Additionally, the use of farmyard manure and chemical fertilizer which include NO₃⁻ and SO₄²⁻ can promote the dissolution process too. Above all, the results of this study can provide consultation for evaluate karst carbon sink more scientifically and accurately.

Key Words: land-use patterns; human influence intensity; Karst processes; precipitation; temperature; soil properties

已有研究表明,岩溶作用所形成的碳汇是快速^[1]、稳定的^[2-3],对碳增汇意义重大^[4]。土壤圈处于大气圈、水圈、岩石圈、生物圈界面地带,与其余几圈层联系紧密,物质能量信息交流转换频繁。土地利用方式变化使几圈层环境因子发生相应改变,通常情况下,在岩溶区随土地利用方式从林地向耕地转换,土壤养分含量降低^[5],土壤结构稳定性降低^[6],持水性能变差^[7],土壤微生物含量降低^[8-9]等都会对岩溶作用产生影响。

近些年来土地利用对岩溶作用影响的研究已在不同地区展开并取得了有意的成果^[10-14],但未见相同地质背景、受人类活动影响程度差异显著的土地利用方式下,不同季节、不同深度同时研究的先

例。本文以川东平行岭谷区重庆青木关典型岩溶槽谷区为例,利用溶蚀试片法结合对应点土壤容重、含水量、CO₂含量、有机质、pH等指标,探讨不同土地利用方式对冬夏两季岩溶作用的影响,为更准确地评估岩溶碳汇效应提供依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

青木关岩溶流域位于重庆市北碚区、沙坪坝区和璧山县的交界处,处于川东平行岭谷区华蓥山帚状褶皱束温塘峡背斜南延段,为“一山二岭一槽”式的典型岩溶槽谷流域。地势总体表现为北高南低,南北高差约 300m。区内地质背景为隔挡式地质构

造,背斜轴部出露地层为三叠系下统嘉陵江组(T_{1j})碳酸盐岩;两翼为三叠系中统雷口坡组(T_{2l})碳酸盐岩和三叠系上统须家河组(T_{3xj})砂页岩(图1)。

本区属于亚热带湿润季风型气候,冬暖夏热,夏季较长,常出现高温、湿热及暴雨天气。多年平均气

温为 18°C ,多年平均降水量为 1000mm ,主要集中在 4—10 月,特别是 6—8 月。区内植被主要有亚热带常绿针叶林和阔叶林等,土壤类型主要有地带性土壤黄壤和非地带性土壤石灰土,石灰土土层较薄,多小于 1m ,洼地中分布水稻土且土层较厚,约 $1\text{—}2\text{m}$ 。

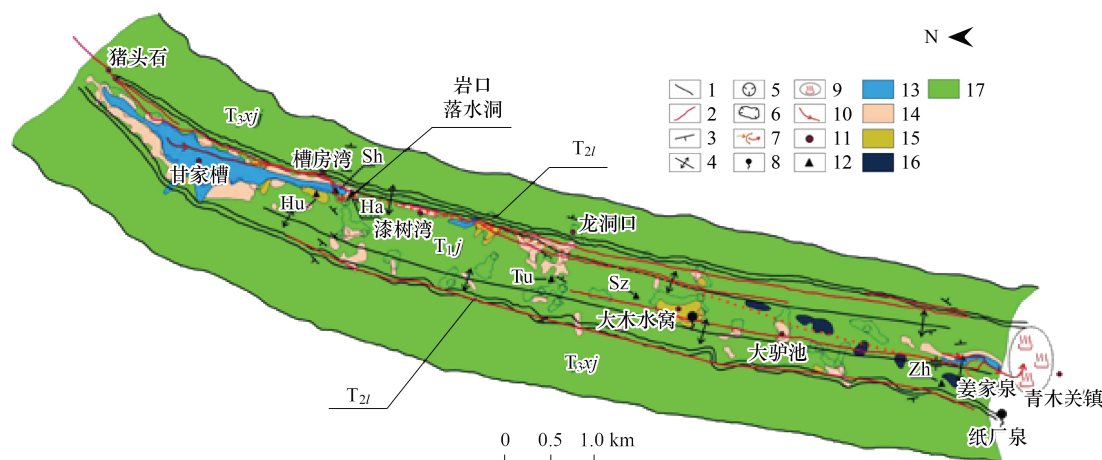


图1 研究区水文地质及土地利用简图

Fig.1 Schematic map of hydrogeology and land use in Qingmuguan karst valley

1: 地层界线及代号;2: 压扭性断层;3: 地层产状;4: 背斜轴部;5: 落水洞;6: 岩溶洼地;7: 地下河及出口;8: 泉点;9: 温泉群;10: 地表水及流向;11: 地名;12: 取样点;13: 水田(Sh);14: 旱地(Ha);15: 撂荒草地(Hu);16: 采石场;17: 林地(Tu:退耕林; Sz:杉竹混交林; Zh:竹林)及其它

1.2 研究方法

1.2.1 试片埋放

采用标准溶蚀试片法^[15],在流域内灰岩区竹林地、旱地、水田、荒地、退耕林地及杉竹混交林地 6 种不同土地利用方式区各选择了一个代表性点挖掘剖面埋置试片,试片分别埋置在地表、土下 20cm、土下 50cm、土下 80cm(图 2),共埋放纯灰岩试片 46 片

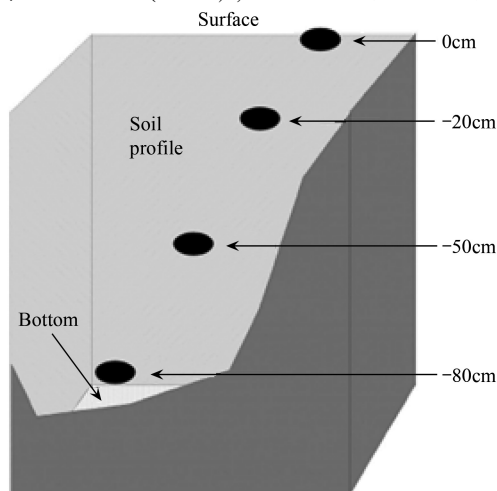


图2 试片放置示意图

Fig.2 Location of the testing limestone tablets

(因竹林土层浅薄,至土下 50cm 已达基岩,因而缺失 80cm 层位试片),取回 45 片(冬季杉竹混交林地表试片丢失)。试片埋放时间分别为冬季:2009 年 11 月 13 日——2010 年 3 月 24 日,夏季:2010 年 6 月 15 日——2010 年 9 月 15 日。同时,在夏季埋放试片时取对应于试片埋放层位土样进行土壤容重、孔隙度、含水量、有机质含量、pH 等的分析,各取样点概况见表 1。

试片取出后用下式计算试验时间内试片单位面积溶蚀量^[12]:

$$ER = (W_1 - W_2) \times 10^7 / T/S$$

式中, ER 为单位面积溶蚀量($\text{mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$); W_1 为试片初重(g); W_2 为试片取回后烘干重量(g); $(W_1 - W_2)$ 为埋放时间内试片绝对溶蚀量(g); T 为埋放天数(d); S 为试片表面积(约 28.91cm^2)。

1.2.2 测试方法

土壤 CO_2 浓度用 GASTEC- CO_2 测试仪测定;土壤有机质的测定采用重铬酸钾容量法;土壤含水量采用酒精燃烧法;容重、孔隙度采用环刀法;土壤 pH 测定使用酸度计法^[16]。

表 1 土壤取样点概况

Table 1 General situation of soil sample sites

取样点代码 Codes	土地利用方式 Patterns	地理坐标 Coordinates	土壤类型及质地 Soil types and texture	微地貌 Micro-landform	坡度/(°) Slope	利用年数 ** /a Used years
Ha	旱地	106.314°E, 29.747°N *	黄壤:上部壤土,下部砂土	洼地缓坡	15	多年 ***
Tu	退耕林	106.302°E, 29.725°N	黄壤:上部壤土,下部轻砂土	垭口洼地	10	5 ****
St	水田	106.314°E, 29.747°N *	水稻土:上部壤土,下部黏土	洼地	0	多年
Sz	杉竹混交林	106.301°E, 29.721°N	石灰土:上部轻黏土,下部壤土	坡地	15	多年
Hu	荒草地	106.313°E, 29.746°N	石灰土:壤土	坡地	30	9 ****
Zh	竹林	106.289°E, 29.684°N	石灰土:上部轻黏土,下部壤土	坡地	10	多年

* 水田旱地均处于槽谷底部,相距约 50m,该精度经纬度无法体现; ** 利用年数均截至试片埋设年份; *** 多年意即几十年来一直为该种利用方式; **** 荒草地与退耕林分别于 2001 年和 2004 年退耕

2 结果与分析

2.1 不同季节溶蚀速率

表 2 列出了各土地利用方式下冬夏两季平均溶蚀量及其比值,从中可以很明显地看出:总体上,冬夏两季溶蚀量差异显著,夏季各点平均溶蚀量为冬季的约 3.87 倍;就不同土地利用方式而言,也均是夏季的大于冬季的,只是不同点的变化幅度不同,平均溶蚀量比值(夏季/冬季)从小到大依次为荒草地、水田、杉竹混交林、旱地、竹林、退耕林。造成季节变化的主要原因可能跟研究区处于亚热带季风气候区,夏季降水量大气温高,冬季降水量少气温低及受其影响的土壤层生物活性强弱有关。除共同影响因素降水量和热量外,造成不同点变化幅度差异的原因可能不同,退耕林、杉竹混交林、竹林虽局地坡度较小,但都处于山坡地带,从取样点到坡脚(即洼地边缘)坡度较大,分别约为 35°、40°、30°,三者与相距最

近洼地底部海拔差值分别约为 70m、60m、50m。高差大可能会使土壤水更容易流失向洼地汇集,而使其含水量降低,从而影响岩溶作用的进行。在降水多的夏季土壤水流失后很快补给,对岩溶作用的影响不明显,溶蚀量较大;而在相对干旱的冬季坡地土壤水流失后则很难补给,溶蚀量大大降低。而同处坡地的荒草地冬夏溶蚀速率变幅相对较小,这可能与距洼地底部垂直高差较小(约 10m),土壤水流失相对较少,冬季地表仍有草被覆盖,蒸发减少使土壤水易于保存有关。处于洼地最底部的水田即便是在冬季也保持着较高的土壤湿度^[17]。而旱地靠近两洼地间较为平缓垭口北侧,东侧为道路,南侧为居民点,西侧为小道,集水区域较小,且所集水多通过道路旁水沟集中排至洼地底部,使冬季土壤含水量较少,这可能是造成其冬夏溶蚀速率差别较大的原因。

表 2 青木关流域不同土地利用方式下冬夏平均溶蚀量 及其比值

Table 2 Mean corrosion rate of different land-use types in Summer (S) and Winter (W) and its ratio (S/W), Qingmuguan

季节 Season	平均溶蚀量 Mean Dissolution Rate/(mg·m ⁻² ·d ⁻¹)						平均值 Average
	竹林 Zh	荒草地 Hu	杉竹混交林 Sz	水田 St	退耕林 Tu	旱地 Ha	
夏季 Summer (S)	52.489	168.376	193.656	234.413	267.815	300.885	202.939
冬季 Winter (W)	7.983	84.396	48.621	79.313	38.178	56.053	52.424
比值 Ratio(S/W)	6.575	1.995	3.983	2.956	7.015	5.368	3.871

2.2 不同人类活动影响强度下的溶蚀速率

本文中人类活动影响强度的界定以定性为主,将水田、旱地两种受人类活动直接影响,有耕作、施肥、喷洒农药等措施,且利用强度较大的土地利用方

式定义为强;将退耕林、荒草地两种因退耕还林还草计划而从农用地转换出来,人类活动影响逐渐变弱的土地利用方式定义为中;将杉竹混交林、竹林两种常年为林地,受人类活动影响较少的土地利用方式

定义为弱。

表 3 所列左侧数值均为属于该强度的两种土地利用方式溶蚀量的平均值。从表中可以看出在夏季 3 种不同强度土地利用方式溶蚀速率均较快,但强强度和中强度的平均溶蚀量较为接近,而比弱强度的大得多。这可能与夏季雨热配套,作物生长活跃,农事活动频繁,特别是有机肥及化肥中硝酸盐、硫酸盐成分随水分进入土壤,从而增强了对试片的溶蚀。而对中强度土地利用方式而言,退耕前所施肥料已消耗殆尽,对其溶蚀的影响也极大降低。而弱强度土地利用则基本无此影响。而在冬季温度较低,降水也少,农田中农作物相较夏季少地多而基本处于闲置状态,且并无施肥,这可能是造成各强度土地利用方式溶蚀量均较小且差别不大的原因之一。

表 3 青木关流域不同人类活动影响强度下溶蚀速率差异

Table 3 The corrosion rate range under different human influence intensity, Qingmuguan

类别 Types	人类活动影响强度 Human Influence Intensity			强度差 Range	
	强 Strong(S)	中 Medium(M)	弱 Weak(W)	S-M	M-W
夏季平均溶蚀量 MCS/(mg·m ⁻² ·d ⁻¹)	267.65	235.38	150.44	32.27	84.93
冬季平均溶蚀量 MCW/(mg·m ⁻² ·d ⁻¹)	67.68	45.30	28.03	22.38	17.27
冬夏总平均溶蚀量 MC(S+W)/(mg·m ⁻² ·d ⁻¹)	167.67	140.34	89.23	27.33	51.10

MCS;Mean Dissolution Rate in Summer;MCW;Mean Dissolution Rate in Winter;MC(S+W);Mean Dissolution Rate in Summer and Winter

2.3 不同深度条件下的溶蚀速率

表 4 是各点各层位总平均溶蚀量占全年溶蚀量的比例,结果是:夏季各值均介于 21.77%—34.15% 之间,地表至-20cm 处微减,然后逐渐增加,最大值出现在-80cm 处,最小值出现在-20cm 处(与地表差

别不大);冬季各值介于 19.20%— 28.31% 之间,地表至-20cm 处增至最大,然后逐渐减小,最大值出现在-20cm 处(与-50cm 处差别不大),最小值则在地表.两相对比,发现最大溶蚀量由夏季的-80cm 处上移至冬季的-20cm 和-50cm 处(图 3)。

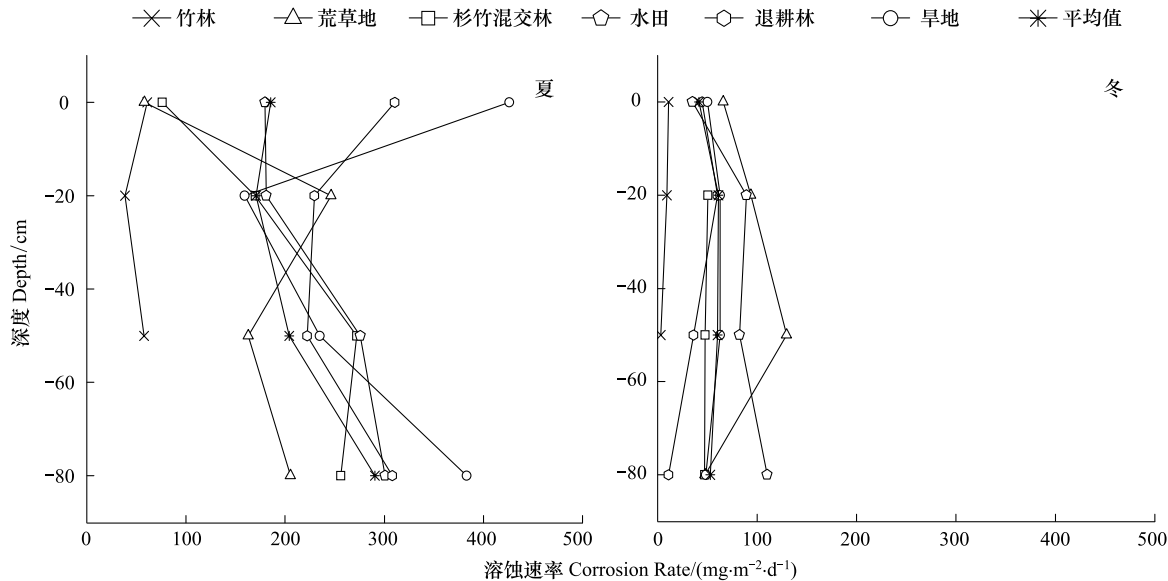


图 3 青木关冬夏两季不同土地利用方式不同层位单位面积平均日溶蚀量

Fig.3 Daily average dissolution rate per unit area of the limestone tablets at different depth under different land use patterns in summer &winter in Qingmuguan

这可能跟夏季太阳辐射强烈,气温高,可以将热量传递到到较深的土壤层,土壤温度总体较高。另外,深部土壤孔隙度较低,容重较大,利于水分的保持,从而使水分和 CO₂作用的时间加长,最终使深部溶蚀量增大。而冬季太阳辐射相对较弱,气温低,热量传递深度有限,可能至-80cm 处已衰减,土壤温度较低可能是影响岩溶作用进行的限制因子。

表 4 青木关冬夏两季不同土地利用方式不同层位石灰岩试片单位面积日溶蚀量比例及对应极值及其比值

Table 4 The ratio of different depth,extreme value and its ratio of daily average per unit area dissolution rate of the limestone tablets under different land use patterns in summer &winter in Qingmuguan

月份 Monthly	层位/cm Layers	层位比例/% Ratio	最小值/ ($\text{mg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$) Min.	对应点 Patterns	最大值/ ($\text{mg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$) Max.	对应点 Patterns	最大/最小 Max./Min.
6—9 月 Jun—Sep	0	21.77	58.32	Hu	426.14	Ha	7.31
	-20	20.06	159.21	Ha	246.69	Hu	1.55
	-50	24.01	163.12	Hu	275.88	Sh	1.69
	-80	34.15	205.37	Hu	383.17	Ha	1.87
12—3 月 Dec—Mar	0	19.20	35.14	Sh	66.09	Hu	1.88
	-20	28.31	50.75	Sz	93.95	Hu	1.85
	-50	27.98	36.25	Tu	129.83	Hu	3.58
	-80	24.51	11.12	Tu	110.17	Sh	9.91

3 讨论

3.1 温度

温度是环境要素的重要组成部分,对地球表层系统的物理、化学、生物过程都有很大影响,岩溶作用作为重要的地表过程,同样深受温度因子影响。

相关研究发现:温度可直接影响溶蚀的化学反应过程,40—90℃ 以下含 CO_2 水溶液对碳酸盐岩的溶蚀强度随温度的升高而增加^[18-19]。温度同样可以影响土壤呼吸,包括根系呼吸作用、土壤微生物活动,表现为夏季呼吸作用最强,冬季最弱^[20-21]。

图 4 为青木关流域在研究时段内的气温变化情况,11 月至次年 2 月温度最低,6 月至 9 月气温最高。而土壤温度与气温往往会保持较好的对应关系^[20],即气温高的时候土壤温度也高,反之亦然。

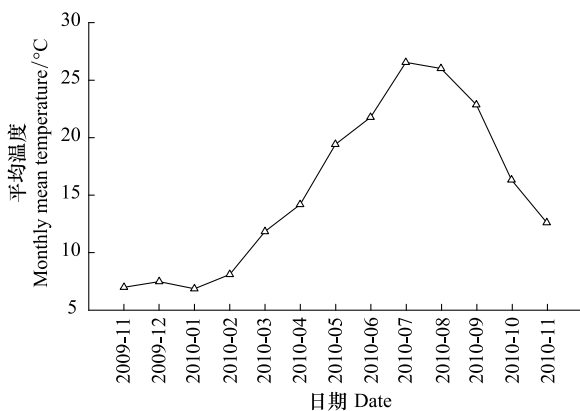


图 4 青木关流域逐月平均气温分布图

Fig.4 The monthly mean temperature, Qingmuguan

试片埋设的夏季几个月份平均气温是冬季的 2.94 倍,而夏季平均溶蚀速率是冬季的 3.87 倍,具

有较好的对应关系,这可能说明温度在试片溶蚀过程中起到了较为重要的作用。

3.2 水分

土壤水分是土壤的重要组成部分,也是影响土壤物质能量转换的重要因素^[18],其主要来源为大气降水。其不仅能为植物和微生物活动提供水分,且因其能够溶解和运送土壤养分,而成为土壤生态系统中物质循环和能量流动的媒介,在土壤矿物质迁移转化过程中具有重要作用。在岩溶系统,土壤水则可以通过影响土壤微生物、土壤 CO_2 、土壤有机质及其它物质的溶解影响溶蚀作用。

从图 5 可以看出,研究区夏季降水远大于冬季,埋放试片的 6—9 月降水量约为 12—3 月的 5.76 倍,也与夏冬溶蚀速率比率 3.87 较为接近。另外,各点夏季平均土壤含水量随深度增加而增加(图 6),与各点夏季除表层外其余层位平均溶蚀速率变化趋势

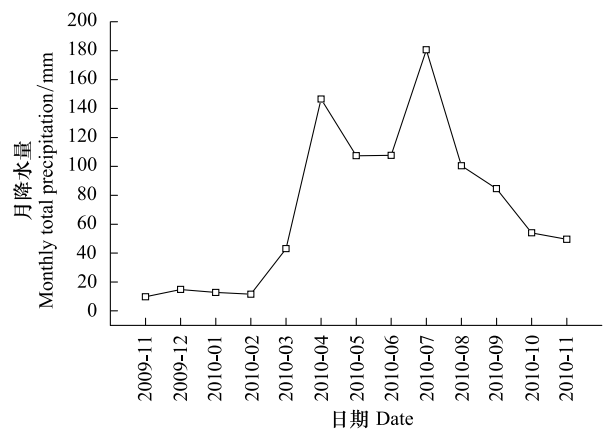


图 5 青木关流域一水文年内分月降水量

Fig.5 The monthly total precipitation of a water year in Qingmuguan

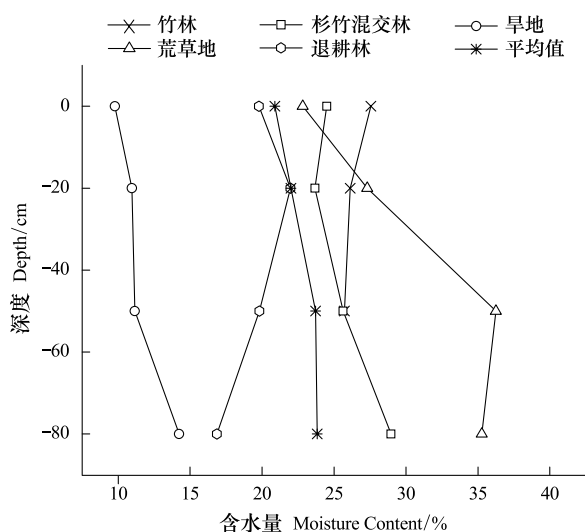


图 6 青木关夏季不同土地利用方式不同层位土壤含水量

Fig.6 Soil moisture contents at different depth under different land use patterns in summer in Qingmuguan

一致。而表层溶蚀量较大则可能与有机质含量远高于其它层位,有更多有机酸参与溶蚀有关。此外,研

究区前人研究成果表明在冬季水田、荒草地、旱地平均土壤含水量分别为 44.27%、36.86%、17.65%^[17],与对应土地利用方式平均壤中溶蚀量的变化趋势相同(图 3)。说明降水量也可能同样是决定溶蚀速率的较为重要的因素之一。

3.3 土壤 CO₂

土壤 CO₂来源于植物根系呼吸作用、土壤生物(含微生物)活动、有机质分解及与近地表大气交换等途径,其含量受土壤理化性质影响下的通气性、土壤生物化学过程的强度、气象条件及上覆植被等因素控制。所以,不同土地利用方式、相同类型土地利用方式不同深度条件下,土壤 CO₂含量差异显著。

土壤 CO₂是岩溶作用重要的驱动力^[4,15],很多学者^[22-25]做过相关研究,认为含量^[23-25]或不同深度处的浓度差^[22]与溶蚀速率成正相关,但一直没定论。为研究青木关岩溶槽谷区土壤 CO₂含量与溶蚀作用的关系,在埋置及取出试片时分别测定了剖面附近土壤中-20cm、-50cm 处 CO₂的含量(表 5)。

表 5 青木关冬夏两季-20cm 和-50cm 日单位面积溶蚀量及其对应的 CO₂含量

Table 5 Daily average per unit area dissolution rate of the limestone tablets and the corresponding CO₂ content at -20 cm and -50 cm depth under different land use patterns in summer&winter in Qingmuguan

时间 Monthly	指标 Indexes	深度 & 对比 Layers	竹林 Zh	荒草地 Hu	杉竹混交林 Sz	水田* St*	退耕林 Tu	旱地 Ha
6—9	CO ₂ 浓度/($\mu\text{L/L}$)	-20cm	1800	6000	6000	—	9600	3600
	CO ₂ content	-50cm	3400	20000	8000	—	11400	4800
		(-50cm)—(-20cm)	1600	14000	2000	—	1800	1200
		(-50cm)/(-20cm)	1.89	3.33	1.33	—	1.19	1.33
	日均溶蚀量/ ($\text{mg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$)	-20cm	38.60	246.69	169.91	181.13	229.56	159.21
		-50cm	57.83	163.12	272.23	275.88	222.51	235.02
	Mean diurnal	(-50cm)—(-20cm)	19.23	-83.57	102.32	94.75	-7.05	75.81
	dissolution mass	(-50cm)/(-20cm)	1.50	0.66	1.60	1.52	0.97	1.48
12—3	CO ₂ 浓度/($\mu\text{L/L}$)	-20cm	2300	2300	2200	3000	1700	2700
	CO ₂ content	-50cm	4000	3600	4000	1700	3100	4000
		(-50cm)—(-20cm)	1700	1300	1800	-1300	1400	1300
		(-50cm)/(-20cm)	1.74	1.57	1.82	0.57	1.82	1.48
	日均溶蚀量/ ($\text{mg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$)	-20cm	9.51	93.95	50.75	89.46	60.47	62.77
		-50cm	3.46	129.83	47.88	82.47	36.25	62.68
	Mean diurnal	(-50cm)—(-20cm)	-6.05	35.88	-2.86	-6.98	-24.21	-0.09
	dissolution mass	(-50cm)/(-20cm)	0.36	1.38	0.94	0.92	0.60	1.00

* 水田因夏季灌水无法检测 CO₂ 含量

从表 5 中可以看出不同土地利用方式下 CO₂ 含量不同,且除冬季水田外其它点 CO₂ 含量都随深度的增加而提高,只是增加的幅度不同,水田-50cm 处

变小可能是与其较高的土壤含水量致土壤空隙多被水占据而使气体较难进入有关。与相应层位的溶蚀数据对比可以发现,夏季除退耕林、荒草地外,其它

点二者变化趋势一致,即 $-50\text{cm} > -20\text{cm}$;冬季却出现了与传统认识不同的地方,除荒草地外,其它点 -50cm 处的溶蚀量并未随 CO_2 含量的增加而增加,而是减少。说明 CO_2 并不是控制夏季退耕林、荒草地及冬季各点溶蚀的主要因素。

对比表 5 和图 5 可以发现在土壤水含量较大的夏季,溶蚀速率与土壤 CO_2 含量呈正相关,二者变化趋势相近;而在冬季,土壤含水量相较夏季少得多,使得溶蚀速率与土壤 CO_2 的关系没那么紧密。这可能与土壤 CO_2 有效利用程度有关,即在 CO_2 浓度一定的情况下,适当多的土壤含水量利于二者相互作用

形成对碳酸盐岩具有侵蚀性的碳酸,进而提高岩溶作用强度。如果含水量过低则会造成 CO_2 过剩,而使二者不能充分反应,不利于溶蚀作用的进行。

3.4 土壤有机质和 pH

土壤有机质是指土壤中的各种含碳的有机化合物,是土壤的重要组成部分,是表征土壤肥力的重要指标,含量虽少,但对土壤的理化生性质影响很大^[26-27]。除竹林地表层外,土壤 pH 值与土壤有机质含量成反相关关系,即土壤有机质含量越高,土壤 pH 值就越低(图 7)。

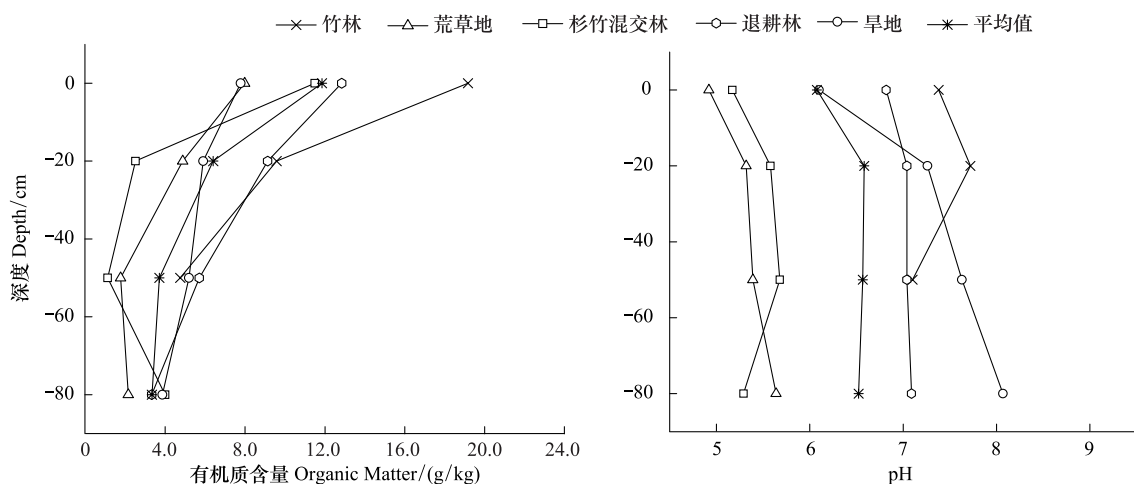


图 7 青木关不同土地利用方式土壤有机质与土壤 pH

Fig.7 Soil organic matter and pH under different land use patterns in Qingmuguan

对于有机质含量和 pH 值对碳酸盐岩溶蚀速率的影响,不同研究者得出的结论不同。有的认为溶蚀速率与有机质含量成正比、与 pH 值成反比^[28],有的认为在有机质含量高的情况下这一关系才存在^[29],还有的认为二者之间并不存在明显的相关关系,而是各种环境因子综合作用的结果^[30]。

对比图 3、图 7 可以看出在夏季有机质含量最高、pH 值最低的表层其溶蚀速率并不最高,低于 -50cm 、 -80cm 处的;但其也不是最低的,高于 -20cm 处。但地表 CO_2 含量(约 $300\mu\text{L/L}$)与大气的相似,仅为 -20cm 、 -50cm 等较深处的 $1/6$ — $1/67$,说明在地表溶蚀中发挥主要作用的可能不是 CO_2 ,而是有机质和 pH。而从 -20cm 、 -50cm 到 -80cm 处溶蚀量逐渐增加,而有机质含量逐渐减少,pH 值逐渐增大说明除表层外,其它层次的溶蚀速率受此二者的影响变小。

3.5 土壤孔隙

土壤孔隙是土壤颗粒间存在的空间,是液态、气态物质在土壤中运移的通道,是土壤重要的物理性质,影响着土壤的水热状况。评价指标一般为土壤孔隙度和土壤容重,而二者为反相关关系。

如图 8 所示,各土地利用方式地表孔隙度、容重较为接近,从地表到 -20cm 土壤孔隙度下降幅度较大,土壤容重大幅增加,而各点 -20cm 与 -50cm 、 -80cm 处的土壤孔隙度和容重变化较小。可能与有机质含量在表层至 -20cm 处大幅减少, -20 — -80cm 范围有机质含量较少且变幅不大有关。

各点平均土壤孔隙度从大到小依次为荒草地(49.75%)、竹林(48.41%)、杉竹混交林(46.27%)、退耕林(46.03%)、旱地(33.51%),土壤质地分别为轻黏土、轻黏土、中壤土、中壤土、砂土^[31],基本上与夏季各点溶蚀速率(图 3)呈反相关关系。在降水量大的夏季,如土壤过于黏重,粘滞力强循环慢^[32],不

利于 pH 值较低侵蚀性较强雨水的快速下渗,减弱了溶蚀作用。而砂土相对松散,土壤水可快速通过^[32],从而使单位时间内通过的侵蚀性较强的水量多于壤土,从而增强了溶蚀。而在冬季,轻黏土和中壤土较好的持水作用使土壤含水量较高,促进了溶

蚀作用的进行,荒草地、杉竹混交林、退耕林溶蚀速率依次减小。旱地 CO₂ 含量不高却保持较高溶蚀速率,可能与其表层土壤孔隙度较大属轻黏土,向下层迅速转换为砂土,水分、空气易于向下运动却不易向上散发,可使土壤 CO₂ 与土壤水充分作用有关。

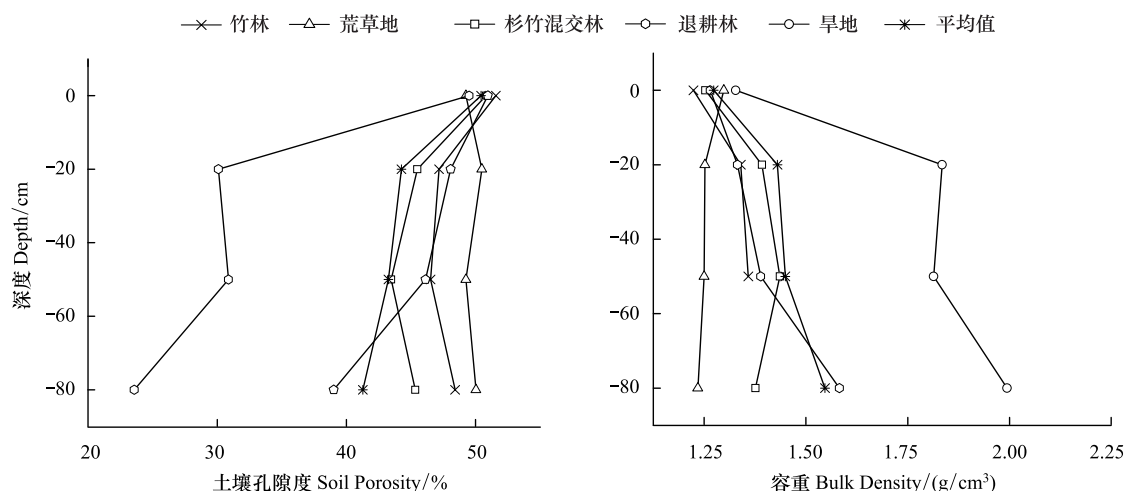


图 8 青木关不同土地利用方式土壤孔隙度与土壤容重

Fig.8 Soil porosity and soil bulk density under different land use patterns in Qingmuguan

4 结论

实验结果表明,研究区冬夏两季岩溶作用强度存在较大差别:夏季各点壤中平均溶蚀量为冬季的 3.87 倍,但不同点冬夏差异不同。且最大溶蚀量从夏季-80cm 处上移至冬季的-20—-50cm 处。

人类活动强度对岩溶作用影响显著,夏季农事活动较多人类活动影响强度大的水田、旱地平均溶蚀速率高于人类活动影响逐渐减弱退耕的退耕林、荒草地的,而受人类活动影响最少的竹林、山竹混交林则最小。冬季农事活动少,各点差值变小。

分析发现,热量和水分仍是影响土壤中溶蚀速率的最基础因素,二者呈较好的正相关关系,部分其它因素通过对其调节而影响岩溶作用。

土壤 CO₂ 在土壤水分较为充足的夏季对岩溶作用影响明显,二者均随深度增加。但在冬季 CO₂ 两者关系并不明显,可能受降水量较少限制。由于地表 CO₂ 含量低,其对表层溶蚀作用影响有限。

土壤有机质与土壤 pH 呈反相关关系,二者对溶蚀速率的影响具有协同性。在有机质含量高,pH 值低的表层对溶蚀作用影响较大,在深层由于有机质含量迅速减小,pH 升高而影响不明显。

土壤孔隙对溶蚀作用的影响是双向的,对于孔隙度大偏黏土壤而言,利于土壤水分的保持,但不利于其渗透,在冬季降水量少的情况下,有助于增强溶蚀;夏季降水虽多但受渗透率限制,影响了溶蚀的进行。而沙质土则相反,渗透率较高,降水可迅速穿透,促进了溶蚀,但持水性能相对较差,降水少的冬季可能限制溶蚀作用。

致谢:西南大学地理科学学院张治伟老师,张兴波,王开然,张德怀,李静文,薛倩倩,颜赫等在野外取样,室内实验中给予帮助;国土资源部/广西岩溶动力学重点实验室章程研究员、蒲俊兵博士在论文写作上给予帮助,特此致谢。

References:

- [1] Liu Z H. The Role of carbonic anhydrase as an activator in carbonate rock dissolution and its significance in atmospheric CO₂ precipitation. *Acta Geoscientia Sinica*, 2001, 22(5): 477-480.
- [2] Adameczyk K, Mirabelle P S, Pines D, Pines E, Nibbering E T J. Real-time observation of carbonic acid formation in aqueous solution. *Science*, 2009, 326(5960): 1690-1694.
- [3] Lü B Y, Liu Z H, Liao C J, Sun H H. The influence of aquatic plants on diurnal variations of hydrochemistry in karst system — A case in the Guilin Karst Experimental site. *Carsologica Sinica*, 2006, 25(4): 335-340.

- [4] Yuan D X, Liu Z H, Jiang Z C, Qin J M, Cao J H, Zhang M L, Li B, He S Y, Lin Y S, Zhang C, Pei J G, Xie Y Q, Yang L Z, Jiang X Z, Lei M T. Carbon cycles and Karst Geological Environments. Beijing: Science Press, 2002; 36-78.
- [5] Zhang C. Speciation of soil nutrient elements and their controlling factors in different land-uses of typical karst spring watershed. Journal of Soil and Water Conservation, 2009, 23(4): 165-169.
- [6] Li Y B, Xie D T. Features of water-stable soil aggregate structure under different land use in karst mountains. Journal of Soil Water Conservation, 2001, 15(4): 122-125.
- [7] Zhang Z W, Zhu Z X, Wang Y, Fu W L, Wen Z L. Soil infiltration capacity and its influencing factors of different land use types in karst slope. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2010, 26(6): 71-76.
- [8] Wang J F, Xie S Y, Feng H F, Yuan W H, Wang C X. Characteristic study of soil microbe under different land-use types in Chongqing karst region. Environmental Science and Management, 2010, 35(3): 150-154.
- [9] Li L, Zhang Y, Wang L B, Wang L M. Vertical changes of the soil microbial biomass and the correlation analysis in different forests. Journal of Central South University of Forestry & Technology, 2007, 27(2): 52-56.
- [10] Zhang C, Xie Y Q, Lü Y, Jiang Y J, Cao J H, Jiang G H, Yang P H, Wang D Y. Impact of land-use patterns upon karst processes: Taking Nongla Fengcong Depression area in Guangxi as an example. Acta Geographica Sinica, 2006, 61(11): 1181-1188.
- [11] Zhang C. Seasonal variation of dissolution rate under the soil at different land uses and its influence factors — A case study of Jinfo Mountain, Chongqing. Geological Review, 2010, 56(1): 136-140.
- [12] Wang D Y, Zhang C, Xie S Y, Yang P H, Zhang W H. Karst dissolution rates of areas with different vegetation types in the sub-mountain region. Acta Geoscientica Sinica, 2007, 28(5): 488-495.
- [13] Wang D Y, Zhang C, Xie S Y, Yang P H, Zhang W H. Response of karstification to land-use types in mountain area — A case study of the karst areas in Bitan and Shuifang springs in Jinfo Mountain, Chongqing, China. Earth Science Frontiers, 2007, 14(4): 222-230.
- [14] Yang P H, Zhang C, Sun Y C, Wu Y X, Gao Y F, Wang D Y, Li L L. Effects of soil environmental factors on the dissolution rate of karst in soils — A case study of the State Jinfo Mountain Nature Reserve, Chongqing. Geology in China, 2007, 34(5): 920-926.
- [15] Yuan D X, Cai G H. Karst Environments. Chongqing: Chongqing Press, 1988; 23-24.
- [16] Institute of Soil Science, CAS, Nanjing. Soil Physical And Chemical Analysis. Shanghai: Shanghai Science and Technology Press, 1978; 132-136, 143-144.
- [17] Wang Z J, Liang X, Yuan D X. Distribution and leaching of dissolved carbon and nitrogen in different soil profiles in karst basin. Journal of Soil and Water Conservation, 2010, 24(6): 83-87, 93.
- [18] Huang S Y, Song H R. The corrosion of carbonates and environment temperature. Carsologica Sinica, 1987, 6(4): 287-296.
- [19] Fan M, Jiang X Q, Liu W X, Zhang J Y, Chen H Y. Dissolution of carbonate rocks in CO₂ solution under the different temperatures, Acta Sedimentologica Sinica, 2007, 25(6): 825-830.
- [20] Li L L, Xiang H, Kuang M S, Xie S Y, Zhang Y Z, Jiang Y J, Liu Y. The regularity of CO₂ release from soils of the epikarst ecosystem in the Jinfu Mountain, Chongqing, Acta Geoscientica Sinica, 2006, 27(4): 229-334.
- [21] Ding F J, Gao Y P, Wu P, Cui Y C, Hu Q. Soil respiration and impact factors of 3 forest types in karst regions. Journal of Soil and Water Conservation, 2010, 24(3): 217-221, 237.
- [22] Xu S Y, He S Y. The CO₂ regime in soil profile and its drive to dissolution in carbonate rock area. Carsologica Sinica, 1996, 15(1/2): 50-57.
- [23] He S Y, Xu S Y, Zhang M L. Observation on soil CO₂ concentration, hydrochemistry, and their relationship with karst process. Carsologica Sinica, 1997, 16(4): 319-324.
- [24] Liu Z H, He S Y, Yuan D X, Zhao J B. The CO₂ regime of soil profile and its drive to dissolution. Hydrology and Engineering Geology, 1998, 25(4): 42-45.
- [25] Zhang D, Shi C X. CO₂ partial pressure, karst dissolution rate and karst micro-landforms on the Qinghai-Tibet Plateau. Acta Geologica Sinica, 2002, 76(4): 565-570.
- [26] Zhu H J, Chen J F, Chen S L, He Y G. Soil Geography. Beijing: Higher Education Press, 2010, 20-26.
- [27] Huang C Y. Soil Sciences. Beijing: China Agriculture Press, 2000; 32-46, 98-118, 286-288.
- [28] Li E X, Jiang Z C, Cao J H, Jiang G H, Deng Y. The comparison of properties of Karst soil and Karst erosion ratio under different successional stages of Karst vegetation in Nongla, Guangxi. Acta Ecologica Sinica, 2004, 24(6): 1131-1139.
- [29] Zhang C, Xie Y Q, Lü Y, Jiang Y J, Cao J H, Jiang G H, Yang P P, Wang D Y. Impact of land-use patterns upon karst processes: taking Nongla Fengcong depression area in Guangxi as an example. Acta Geographica Sinica, 2006, 61(11): 1181-1188.
- [30] Lan J C, Fu W L, Zhen X J, Yan B, Zhang T, Peng J T. Effects of soil properties on the dissolution rate of karst in soils in karst mountain area. Journal of Soil and Water Conservation, 2011, 25(2): 58-62.
- [31] Lin D Y. Soil Sciences. Beijing: Chinese Forestry Press, 2002; 101.
- [32] Liu L H, Jiang Y J, Wang A Y, Gou P F. Infiltration characteristics under different land-uses in karst valley area, 2010,

30(4): 51-55, 59.

参考文献:

- [1] 刘再华. 碳酸酐酶对碳酸盐岩溶解的催化作用及其在大气 CO₂ 沉降中的意义. 地球学报, 2001, 22(5): 477-480.
- [3] 吕保樱, 刘再华, 廖长君, 孙海龙. 水生植物对岩溶水化学日变化的影响——以桂林岩溶水文地质试验场为例. 中国岩溶, 2006, 25(4): 335-340.
- [4] 袁道先, 刘再华, 蒋忠诚, 覃嘉铭, 曹建华, 张美良, 李彬, 何师意, 林玉石, 章程, 裴建国, 谢运球, 杨立铮, 蒋小珍, 雷明堂. 碳循环与岩溶地质环境. 北京: 科学出版社, 2003: 36-78.
- [5] 章程. 典型岩溶泉流域不同土地利用方式土壤营养元素形态及其影响因素. 水土保持学报, 2009, 23(4): 165-169.
- [6] 李阳兵, 谢德体. 不同土地利用方式对岩溶山地土壤团粒结构的影响. 水土保持学报, 2001, 15(4): 122-125.
- [7] 张治伟, 朱章雄, 王燕, 傅瓦利, 文志林. 岩溶坡地不同利用类型土壤入渗性能及其影响因素. 农业工程学报, 2010, 26(6): 71-76.
- [8] 王建锋, 谢世友, 冯慧芳, 袁文浩, 王春晓. 岩溶槽谷区不同土地利用方式下土壤微生物特征研究. 环境科学与管理, 2010, 35(3): 150-154.
- [9] 李灵, 张玉, 王利宝, 王丽梅. 不同林地土壤微生物生物量垂直分布及相关性分析. 中南林业科技大学学报, 2007, 27(2): 52-56.
- [10] 章程, 谢运球, 吕勇, 蒋勇军, 曹建华, 姜光辉, 杨平恒, 王冬银. 不同土地利用方式对岩溶作用的影响——以广西弄拉峰丛洼地岩溶系统为例. 地理学报, 2006, 61(11): 1181-1188.
- [11] 章程. 不同土地利用土下溶蚀速率季节差异及其影响因素. 地质论评, 2010, 56(1): 136-140.
- [12] 王冬银, 章程, 谢世友, 杨平恒, 张文晖. 亚高山不同植被类型区的雨季岩溶溶蚀速率研究. 地球学报, 2007, 28(5): 488-495.
- [13] 王冬银, 章程, 谢世友, 杨平恒, 张文晖. 山区岩溶作用对土地利用方式的响应——以重庆金佛山国家自然保护区为例. 地学前缘, 2007, 14(4): 222-230.
- [14] 杨平恒, 章程, 孙玉川, 吴月霞, 高彦芳, 王冬银, 李林立. 土壤环境因子对土下岩溶溶蚀速率的影响. 中国地质, 2007, 34(5): 920-926.
- [15] 袁道先, 蔡桂鸿. 岩溶环境学. 重庆: 重庆出版社, 1988: 23-24.
- [16] 中国科学院南京土壤研究所. 土壤理化分析. 上海: 上海科学技术出版社, 1978: 132-136, 143-144.
- [17] 汪智军, 梁轩, 袁道先. 岩溶流域不同土壤剖面溶解性碳氮分布和淋失特征. 水土保持学报, 2010, 24(6): 83-87, 93.
- [18] 黄尚瑜, 宋焕荣. 碳酸盐岩的溶蚀与环境温度. 中国岩溶, 1987, 6(4): 287-296.
- [19] 范明, 蒋小琼, 刘伟新, 张建勇, 陈红宇. 不同温度条件下 CO₂ 水溶液对碳酸盐岩的溶蚀作用. 沉积学报, 2007, 25(6): 825-830.
- [20] 李林立, 向颖, 况明生, 谢世友, 张远瞩, 蒋勇军, 刘玉. 重庆金佛山表层岩溶生态系统土壤的 CO₂ 释放规律. 地球学报, 2006, 27(4): 229-334.
- [21] 丁访军, 高艳平, 吴鹏, 崔迎春, 胡冀. 喀斯特地区 3 种林型土壤呼吸及其影响因子. 水土保持学报, 2010, 24(3): 217-221, 237.
- [23] 何师意, 徐胜友, 张美良. 岩溶土壤中 CO₂ 浓度、水化学观测及其与岩溶作用关系. 中国岩溶, 1997, 16(4): 319-324.
- [24] 刘再华, 何师意, 袁道先, 赵景波. 土壤中的 CO₂ 及其对岩溶作用的驱动. 水文地质工程地质, 1998, (4): 42-45.
- [25] 章典, 师长兴. 青藏高原的大气 CO₂ 含量、岩溶溶蚀速率及现代岩溶微地貌. 地质学报, 2002, 76(4): 565-570.
- [26] 朱鹤健, 陈健飞, 陈松林, 何宜庚. 土壤地理学. 北京: 高等教育出版社, 2010: 20-26.
- [27] 黄昌勇主编. 土壤学. 北京: 中国农业出版社, 2000: 32-46, 98-118, 286-288.
- [28] 李恩香, 蒋忠诚, 曹建华, 姜光辉, 邓艳. 广西弄拉岩溶植被不同演替阶段的主要土壤因子及溶蚀率对比研究. 生态学报, 2004, 24(6): 1131-1139.
- [29] 章程, 谢运球, 吕勇, 蒋勇军, 曹建华, 姜光辉, 杨平恒, 王冬银. 不同土地利用方式对岩溶作用的影响——以广西弄拉峰丛洼地岩溶系统为例. 地理学报, 2006, 61(11): 1181-1188.
- [30] 蓝家程, 傅瓦利, 甄晓君, 袁波, 张婷, 彭景涛. 岩溶山区土壤性质及其对土下溶蚀速率的影响. 水土保持学报, 2011, 25(2): 58-62.
- [31] 林大仪主编. 土壤学. 北京: 中国林业出版社, 2002: 101.
- [32] 刘丽红, 蒋勇军, 王翱宇, 苟鹏飞. 岩溶槽谷区不同土地利用方式土壤入渗规律研究. 水土保持通报, 2010, 30(4): 51-55, 59.

ACTA ECOLOGICA SINICA Vol.34, No.6 Mar., 2014 (Semimonthly)

CONTENTS

Frontiers and Comprehensive Review

- Impacts of global warming on litter decomposition SONG Piao, ZHANG Naili, MA Keping, et al (1327)
- From system to landscape: the other orientation of regional material flow analysis ZHANG Xiaogang, ZENG Hui (1340)
- A multi-dimensional approach for wetland ecosystem service valuation SONG Yuqin, ZHANG Xiaolei (1352)
- Molecular mechanisms of the insect juvenile hormone JIN Minna, LIN Xinda (1361)
- Microbial deterioration in ancient cave and wall paintings LI Qiang, GE Qinya, PAN Xiaoxuan, et al (1371)
- Study on ecological safety evaluation and warning of wetlands in Tumen River watershed based on 3S technology
..... ZHU Weihong, MIAO Chengyu, ZHENG Xiaojun, et al (1379)
- A review of transboundary protected areas network establishment WANG Wei, TIAN Yu, CHANG Ming, et al (1391)

Autecology & Fundamentals

- Water consumption characteristics and water use efficiency of *Eucalyptus urophylla* × *Eucalyptus grandis* and bamboo-willow
seedlings QIU Quan, PAN Xin, LI Jiyue, et al (1401)
- Three warming scenarios differentially affect the morphological plasticity of an invasive herb *Alternanthera philoxeroides*
..... CHU Yanmei, YANG Jian, LI Jingji, et al (1411)
- The influence of meteorological factors and soil physicochemical properties on karst processes in six land-use patterns in summer
and winter in a typical karst valley LIU Wen, ZHANG Qiang, JIA Yanan (1418)
- Effects of nanocarbon application on nitrogen absorption and utilization of flue-cured tobacco
..... LIANG Taibo, YIN Qisheng, ZHANG Yanling, et al (1429)
- The stand spatial model and pattern based on voronoi diagram LIU Shuai, WU Shuci, WANG Hong, et al (1436)
- Dynamic analysis of spatial structure in a close-to-nature *Phyllostachys edulis* stands
..... QIU Jianxi, TANG Mengping, SHEN Lifen, et al (1444)
- Phenotypic diversity in natural populations of *Sapindus mukorossi* based on fruit and seed traits
..... DIAO Songfeng, SHAO Wenhao, JIANG Jingmin, et al (1451)
- Development of compatible biomass models for trees from different stand origin ... FU Liyong, LEI Yuancai, SUN Wei, et al (1461)

Population, Community and Ecosystem

- The impact of understory vegetation structure on growth of *Polygonatum cyrtoneura* in extensively managed *Phyllostachys edulis*
plantation FAN Yanrong, CHEN Shuanglin, YANG Qingping, et al (1471)
- Short-term effects of CO₂ concentration elevation, warming and transgenic *Bt* rice cropping on soil labile organic carbon and
nitrogen, and nematode communities CHEN Jing, CHEN Fajun, LIU Manqiang, et al (1481)
- Temporospatial variations in net ecosystem productivity in Northeast China since 1961
..... LI Jie, ZHANG Yuandong, GU Fengxue, et al (1490)
- Assessment of the habitat suitability for waterfowls in the Panjin, Liaoning with GIS and remote sensing
..... DONG Zhangyu, LIU Dianwei, WANG Zongming, et al (1503)
- Distribution of soil macropores and their influence on saturated hydraulic conductivity in the Huoditang forest region of the
Qinling Mountains LU Bin, ZHANG Shengli, LI Kan, et al (1512)

- Influences of phosphorus concentration on interactions among *Microcystis aeruginosa*, *Daphnia magna* and *Ceratophyllum demersum* ...
 MA Jianmin, JIN Ping, GUO Meng, et al (1520)
- Allelopathic inhibition and mathematical models of *Chara vulgaris* extracts on two freshwater algae species
 HE Zongxiang, LIU Lu, LI Cheng, et al (1527)
- Flora analysis of riparian vegetation in Yongding-Haihe river system, China XIU Chen, OUYANG Zhiyun, ZHENG Hua (1535)
- Stream habitat assessment of Dong River, China, using *River Habitat Survey* method
 WANG Qiang, YUAN Xingzhong, LIU Hong, et al (1548)

Landscape, Regional and Global Ecology

- Appling SWAT model to explore the impact of changes in land use and climate on the streamflow in a Watershed of Northern
 China GUO Juntong, ZHANG Zhiqiang, WANG Shengping, et al (1559)
- Climate response of tree growth along an altitudinal gradient in the Changbai Mountains, Northeast China
 CHEN Li, YIN Yunhe, ZHAO Dongsheng, et al (1568)
- The dispersion of airborne pollen and its relationship with major climatic parameters in Shijiazhuang
 LI Ying, LI Yuecong, LÜ Suqing, et al (1575)
- The change of soil carbon and nitrogen under different grazing gradients in Hulunber meadow steppe
 YAN Ruirui, XIN Xiaoping, WANG Xu, et al (1587)
- Spatial distribution and influencing factors of farmland soil organic matter and trace elements in the nansihu region
 WU Jie, LI Yuhuan, LI Zengbing, et al (1596)

Resource and Industrial Ecology

- Transnational land use and its potential environmental consequence LU Xiaoxuan (1606)

《生态学报》2014 年征订启事

《生态学报》是由中国科学技术协会主管,中国生态学学会、中国科学院生态环境研究中心主办的生态学高级专业学术期刊,创刊于 1981 年,报道生态学领域前沿理论和原始创新性研究成果。坚持“百花齐放,百家争鸣”的方针,依靠和团结广大生态学科工作者,探索生态学奥秘,为生态学基础理论研究搭建交流平台,促进生态学研究深入发展,为我国培养和造就生态学科人才和知识创新服务、为国民经济建设和发展服务。

《生态学报》主要报道生态学及各分支学科的重要基础理论和应用研究的原始创新性科研成果。特别欢迎能反映现代生态学发展方向的优秀综述性文章;研究简报;生态学新理论、新方法、新技术介绍;新书评价和学术、科研动态及开放实验室介绍等。

《生态学报》为半月刊,大 16 开本,280 页,国内定价 90 元/册,全年定价 2160 元。

国内邮发代号:82-7,国外邮发代号:M670

标准刊号:ISSN 1000-0933 CN 11-2031/Q

全国各地邮局均可订阅,也可直接与编辑部联系购买。欢迎广大科技工作者、科研单位、高等院校、图书馆等订阅。

通讯地址:100085 北京海淀区双清路 18 号 电 话:(010)62941099; 62843362

E-mail: shengtaixuebao@rcees.ac.cn 网 址: www.ecologica.cn

本期责任副主编 薛建辉

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 34 卷 第 6 期 (2014 年 3 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA

(Semimonthly, Started in 1981)

Vol. 34 No. 6 (March, 2014)

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	王如松	Editor-in-chief	WANG Rusong
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		



ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

国内外公开发行

国内邮发代号 82-7

国外发行代号 M670

定价 90.00 元