

喀斯特低热河谷石漠化区环境梯度的小气候效应^{*}

——以贵州花江峡谷区小流域为例

容 丽^{1,2} 王世杰^{1,*} 杜雪莲^{1,2}

(¹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; ²中国科学院研究生院, 北京 100039)

摘 要 对典型喀斯特石漠化小流域区 4 种石漠化等级(潜在(L)、轻度(SL)、中度(M)、强度(ST))样地的小气候特征进行了监测,对比分析了它们的气温、相对湿度、光强分布和土壤温度、湿度分布状况和日变化动态。结果表明,各等级石漠化样地内光照强度、气温及其变动幅度的大小顺序为 $ST > M > SL > L$; 土温和土壤湿度及其变动幅度为 $M > ST > SL > L$; 大气相对湿度及其变动幅度为 $ST > M > SL > L$ 。强度石漠化样地内日平均相对湿度雨季仅 76%, 旱季只有 51%, 分别与潜在石漠化相差 13% 和 35%; 光照强度为潜在的 4 倍以上; 雨季气温高 3℃; 表土(5 cm)土温最高相差 16.5℃; 日均表土含水率低 4.97%。随着石漠化程度的加深,退化生态系统的环境调蓄能力逐渐减弱。

关键词 喀斯特石漠化, 环境梯度, 小气候变化, 小流域, 花江峡谷

中图分类号 S718.512 文献标识码 A 文章编号 1000-4890(2006)09-1038-06

Microclimatic effects along an environmental gradient in karst rocky desertified area: A case study of a small catchment in Huajiang Gorge of Guizhou Province. RONG LI^{1,2}, WANG Shijie¹, DU Xuelian^{1,2} (¹ State Key Laboratory of Environmental Geochemistry, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550002, China; ² Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China). Chinese Journal of Ecology, 2006, 25 (9) : 1038 ~ 1043.

Based on the measurement of light intensity, air temperature, soil temperature, soil humidity, and relative humidity (RH) in a typical karst rocky desertified catchment of Huajiang Gorge of Guizhou Province, this paper compared and analyzed the distribution characteristics and daily changes of these microclimatic parameters on latent (L), slight (SL), medium (M), and strong (ST) rocky desertified lands. The results showed that light intensity, air temperature, and their changing amplitude followed the order of $SE > M > SL > L$, soil temperature and soil humidity followed the order of $M > SE > SL > L$, and RH and its changing amplitude followed the order of $SE > M > SL > L$. Compared with those on latent rocky desertified land, the daily average RH on strong rocky desertified land was 13% less in rainy season and 35% less in dry season, light intensity was 4 times more, air temperature was 3℃ higher in rainy season, surface soil (0 ~ 5 cm) temperature had a 16.5℃ difference, and daily average soil water content was 4.97% less. All of these demonstrated that the modulation ability of karst ecosystem decreased seriously with increasing degree of karst rocky desertification.

Key words karst rocky desertification, environmental gradient, microclimatic variance, small catchment, Huajiang Gorge.

1 引 言

喀斯特石漠化是在 20 世纪 90 年代末才受到普遍重视的^[2,19,23]。它代表了世界上一个比较独特的荒漠类型,即湿润区石质荒漠化,形成了独特的区域生态系统。荒漠化是生态系统退化的过程和结果,它不仅破坏了系统结构,且通常导致生态机能障碍^[22],荒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。

近年来,对常态地貌中的森林、草原、沙漠、农田

等下垫面的小气候环境及热量平衡特征已有许多学者进行了研究^[1,3~10,12,13,15~18,20,21],也有部分学者对喀斯特森林地区的气候因素及该区最有特色的峰丛漏斗森林的小气候条件、喀斯特森林的不同小生境的小气候特征进行研究^[4,8,9,13,14]。本研究以喀斯特石漠化区具有代表意义的喀斯特峡谷区为背景,对花江峡谷查耳岩小流域 4 种石漠化等级中的

*中国科学院创新团队国际合作伙伴计划、科技支黔工程项目和中国科学院知识创新前沿领域资助项目。

* * 通讯作者

收稿日期:2005-10-23 接受日期:2006-06-02

小气候要素及土壤水分特征进行了观测研究,为深入研究喀斯特石漠化景观生态恢复与环境小气候的关系提供参考。

2 研究地区与研究方法

2.1 自然概况

花江峡谷位于贵州西南部,关岭县与贞丰县交界的北盘江两岸,属于贵州喀斯特石山区的典型峡谷地貌,面积 50 km²,岩石裸露率 > 70%,石漠化现象非常严重。基岩为纯质石灰岩与白云岩。土壤以黑色石灰土为主,呈零星分布,在微型台地上分布面积相对较大。植被多生长于石缝、石沟、小土坑、微台地上。研究区查耳岩流域位于峡谷区内,海拔 823~1 038 m,流域长 1.9 km,高差约 200 m,面积 1.2 km²,地貌类型为喀斯特峰丛谷地,石漠化以中强度为主,多分布于坡面。该流域属北盘江谷坡上的干谷系之一,呈西南向东北方向延伸,泉点出露多沿槽谷底部分布。地表破碎,坡度大,水土流失严重。

花江峡谷属于比较典型的亚热带低热河谷,冬春温暖干旱,夏秋湿热,热量资源丰富。年均温 18.4℃, 10 月积温 6 542℃, 年均降水量 1 100 mm,年均降雨量时空分布不均,5~10 月降雨量占全年总降雨量的 83%。由于人为的破坏,现存原生植物以耐旱耐浅土的先锋树种为主,乔灌层次不明显,具有明显的人为干扰所带来的次生性质,自然植被主要分布在山顶、陡坡、岩石裸露率极大而无开垦价值的地点。石漠化层次比较明显,同一地域不同石漠化环境形成了独特的小气候特征。

2.2 观测方法

表 1 研究样地的基本概况

Tab.1 Basic features of the sample plots

石漠化强度	最大土壤厚度 (cm)	植被类型	植被盖度 (%)
潜在石漠化 (005, 028, 053 样地)	60 ~ 80	以香叶树 (<i>Lindera communis</i>)、清香木 (<i>Pistacia weinmannifolia</i>)、毛椿 (<i>Toona sinensis</i> var. <i>scheniana</i>)、毛麻楝 (<i>Chukrasia tabularis</i> var. <i>velutina</i>)、齿叶黄皮 (<i>Clausena duniana</i>)、圆叶乌桕 (<i>S. rotundifolm</i>) 等乔木为主的中幼林	80
轻度石漠化 (032, 051, 042, 062 样地)	50 ~ 80	以野桐 (<i>Mallotus japonicus</i> var. <i>floccosus</i>)、羊蹄甲 (<i>Bauhinia</i> sp.)、灰毛浆果楝 (<i>Cipadessa cinerascens</i>)、乌桕 (<i>Sapium sebiferum</i>)、毛麻楝 (<i>Chukrasia tabularis</i> var. <i>velutina</i>)、粗糠柴 (<i>Mallotus philippinensis</i>)、清香木 (<i>Pistacia weinmannifolia</i>)、广西密花树 (<i>Rapanea kwangsiensis</i>)、悬钩子、五节芒 (<i>Miscanthus floridulus</i>)、紫茎泽兰 (<i>Eupatorium adenophorum</i>) 等为主的灌丛	60 ~ 80
中度石漠化 (031, 052, 040, 061 样地)	30 ~ 40	以构 (<i>Broussonetia papyrifera</i>)、悬钩子、红背山麻杆 (<i>Alchornea trewioides</i>)、牡荆、八角枫、苦楝 (<i>Melia azedarach</i>)、一年蓬 (<i>Erigeron annuus</i>) 为主的灌草丛	40 ~ 60
强度石漠化 (030, 050, 041, 060 样地)	15 ~ 30	以八角枫 (<i>Alangium chinense</i>)、粗糠柴 (<i>Mallotus philippinensis</i>)、构、香椿 (<i>T. sinensis</i>)、红背山麻杆、野桐 (<i>Mallotus japonicus</i> var. <i>floccosus</i>)、仙人掌 (<i>Opuntia dilienii</i>)、一年蓬、萹草 (<i>Arthraxon hispidus</i>) 为主的稀疏灌草丛	15 ~ 30

通过对小流域地形地貌的踏勘,结合小流域内植被及土被分布情况,划分了 4 种等级的石漠化强度类型:强度石漠化 (Strong, ST)、中度石漠化 (Medium, M)、轻度石漠化 (Slight, SL) 和潜在石漠化 (Latent, L),关于等级的划分标准详见文献^[19]。以代表性样地法^[11]为主要取样方式,沿流域上、中、下游各布置样地 1 套(每套包括不同石漠化等级样地 1~2 个),共选择 15 个不同石漠化等级的代表性样地进行观测(图 1)。研究样地的基本情况见表 1。

选择当地降雨较多的 8 月及降雨较少的 12 月,进行了 2 次典型天气(无云晴朗日)监测。测定样地内离地面 1.5 m 高处的光照强度和空气温湿度、气

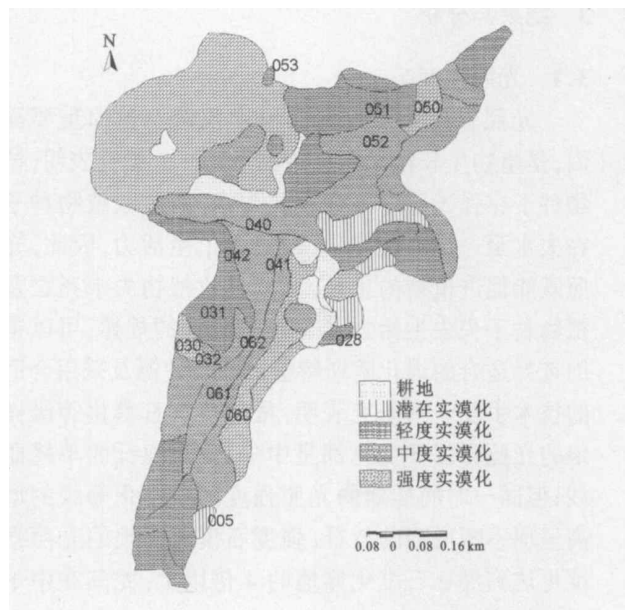


图 1 研究区石漠化等级及样地分布

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

压等指标;用 ZDS-10 照度计测定光照强度,阿斯曼通风干湿度计测定气温和相对湿度。曲管地温计测定 0~30 cm 处的土壤温度。每个指标分别选择 3 个典型点,取平均值。每日从 9:00~17:00 间隔 2 h 同时观测 1 次,13:00 和 15:00 各加密监测 1 次。同时每日(8:00、14:00、18:00)采用烘干称重法测定各样地不同土层(0~5,5~10,10~20 和 20~30 cm)土壤质量含水量(SWC),取 3 个重复样测定结果的平均值。用 $S = 0.1hm$ 计算包含土壤物理性质信息的土层储水量 $S(\text{mm})$ 式中, h 为土层厚度(10 cm), m 为质量含水率(%), ρ 为该土层土壤容重(g cm^{-3})。

3 结果与分析

3.1 光照强度

光照强度是影响地面温度及蒸发量的重要原因,是植物生长情况的控制因子之一。研究表明,植物种子在强光照射下会很快失水,而多数植物种子在失水至一定的程度后,即失去了生活力,因此,光照既能促进植物的生长,又能导致植物失水死亡及植物种子失去生活力^[18]。研究光照的规律,可以帮助选择适合的退化喀斯特植被恢复种源及采用合适的技术手段。本研究表明,虽然所有石漠化等级样地的光照强度日变化都呈中午高、早晚低的单峰曲线;但同一时间样地的光照强度随石漠化等级的增高呈现不断增强的特征,强度石漠化样地的光照强度可达到潜在石漠化样地的 4 倍以上,尤其在中午表现最为明显(图 2)。

3.2 温度、湿度变化特征

3.2.1 气温变化特征 由不同石漠化等级样地间气温的均值(表 2)可知,夏季(8 月)石漠化样地日均温度均比未发生石漠化(潜在)样地的温度要高,平均日均温高 3 ;冬季(12 月)日均温各样地基本持平,未显示明显差异。石漠化样地温度日变幅差异显著,强度石漠化样地最大,冬季最高达 15.5 ,夏季 8.4 ,存在着以下的变化序列:ST>M、SL>L。

这与下垫面的性质,尤其是与低储热能力岩石的裸露率高低密切相关。强度石漠化样地由于没有植物的遮蔽,空气流动性好,也导致了其升温快、温度高、气温日变幅大;而轻度石漠化和潜在石漠化样地气温的变化与其它等级石漠化样地相比具有相对滞后性,在夏季则由于其表面植被郁闭度大,林木枝叶截留了一部分太阳辐射,也减低了空气的热交换能力,因此其峰值温度比中、强度石漠化样地低,反映了森林保温作用,也从样地小生境上反映出了残存森林斑块对局部小气候的调节作用,因此岩石裸露率越高,林木郁闭度越小的中、强度石漠化样地对温度的缓冲能力越弱,导致其温度的日变幅要比潜在、轻度石漠化要剧烈得多。

3.2.2 土壤温度随深度的变化特征 由于喀斯特石漠化区基岩大面积裸露,土层浅薄,土壤贫瘠且呈不连续性,分布也比较零星,土壤厚度变异大,因此,土壤小生境具有高度异质性的特点。不同等级的石漠化样地在同一时刻土壤温度的垂直变化规律为(图 3),除冬季的强度石漠化样地早晨表层土温低于下部外,随着土层深度的增加,土壤温度均呈下降

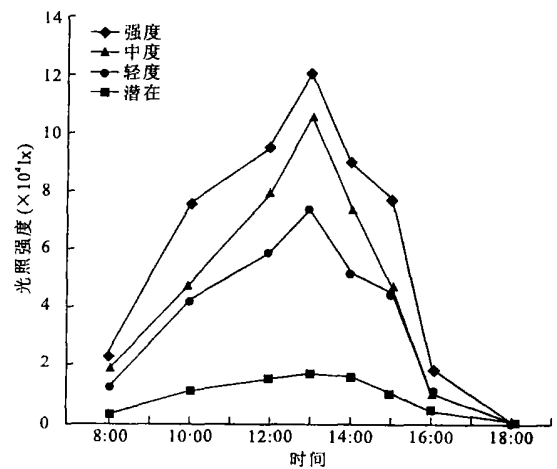


图 2 不同石漠化等级代表性样地的光照强度日变化
Fig. 2 Daily variance of light intensity in representative sample plots with different karst rocky desertification degrees

表 2 不同石漠化等级样地的日均气温变化(夏季/冬季)()

Tab. 2 Diurnal variations of mean temperature in sample plots with different karst rocky desertification degrees (summer/ winter)

气温	潜在石漠化				轻度石漠化				中度石漠化				强度石漠化						
	005	028	053	平均值	032	051	062	042	平均值	031	052	061	040	平均值	030	050	041	060	平均值
日均值	27.8/ 18.9	24.9/ 18.7	25.0/ 14.5	25.9/ 17.4	30.6/ 19.6	27.1/ 14.8	27.3/ 14.8	26.2/ 15.2	27.8/ 16.1	28.0/ 19.3	27.5/ 14.5	27.7/ 14.2	24.8/ 14.5	27.0/ 15.6	30.9/ 21.4	27.0/ 15.0	27.2/ 15.7	30.3/ 15.1	28.9/ 16.8
变幅	2.2/ 2.0	0.2/ 4.4	2.6/ 1.8	1.7/ 2.8	6.8/ 11.0	2.2/ 3.3	7.2/ 5.7	4.9/ 2.6	5.3/ 5.7	4.2/ 12.6	6.6/ 5.2	7.6/ 2.0	3.4/ 2.6	5.5/ 5.6	4.3/ 15.5	7.8/ 2.8	3.4/ 2.9	8.4/ 7.0	6.0/ 7.1

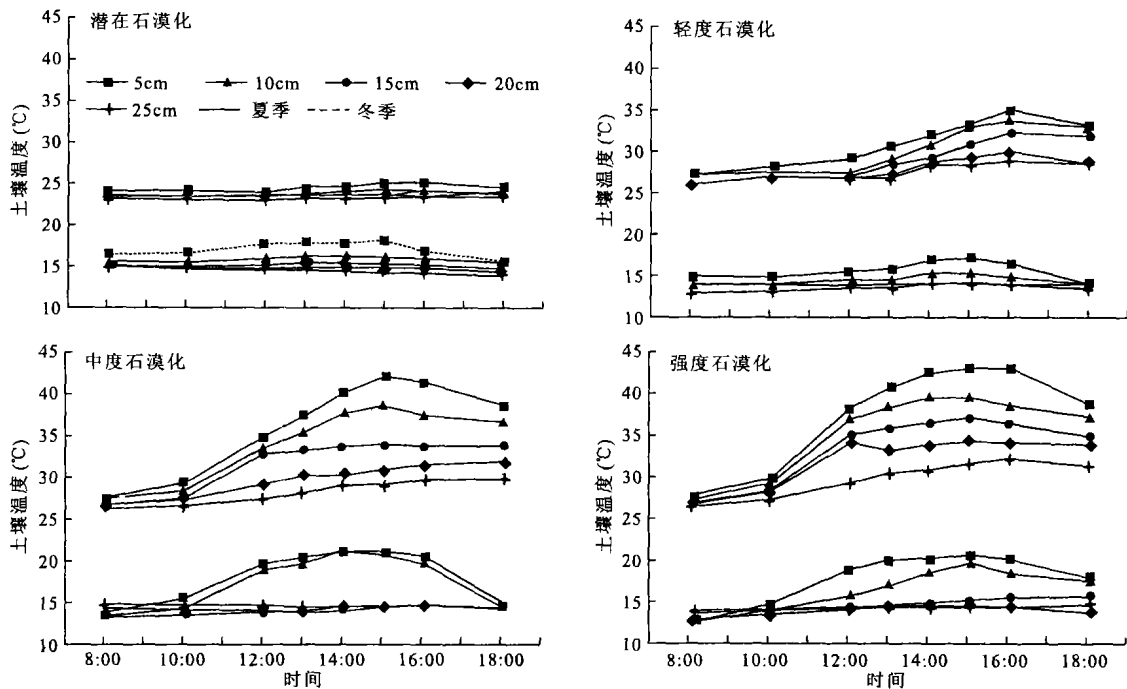


图3 不同石漠化等级代表性样地不同土深土温日变化(夏季/冬季)

Fig.3 Diurnal variations of soil temperature with depths of soil in representative sample plots with different karst rocky desertification degrees (summer/winter)

趋势且降幅减缓,到达 20 cm 深度后又开始上升,有时甚至出现逆温现象,地温随时间的变化呈不对称的单峰曲线。除潜在石漠化样地各层土温变化差异不明显外,其余各石漠化等级样地夏季(5~15 cm)/冬季(5~10 cm)上部土层均于 15:00~16:00 达到一天中最大值,而下层土土温(>15 cm)日动态稳定。土壤厚度小的生境,日动态过程中同一时刻其地温的变化特征呈单一变化方向,并不出现到达某一深度后又上升的情况,这也是样地土壤浅薄性的反映;表土温度在各石漠化等级样地中差异最为显著,尤其是夏季,中、强度石漠化等级样地表土(5 cm)土温(41.5)15:00 时与潜在石漠化样地(25)相差达 16.5。

无论是夏季,还是冬季,土壤各深度处的温度一般在 10:00 后至日落时较高。强、中度石漠化样地在中午时刻由于岩石热容量的影响增热快,浅层土壤的温度比相同土层轻度及潜在石漠化地区要高得多。轻度和潜在石漠化样地在植被覆盖度高的夏秋季节,土温变化率明显小于中强度石漠化样地,其中潜在石漠化样地土温变化稳定,几乎未有波动,土温在表层与下层间没有明显差异,而随着石漠化程度的加剧,不同土层间温度的差异随之加大(图 3)。

由此可见,潜在、轻度石漠化样地中的森林、灌丛对温度的调节作用深入到林内土壤,体现出保温的生态功能。

3.2.3 大气相对湿度变化特征 样地大气相对湿度的日动态均呈“U”型变化(图 4),早晨相对湿度常出现较高值,日出后湿度的上升导致湿度迅速下降,在气温最高、太阳辐射最强时,相对湿度最低,日落时湿度又迅速上升。

不同等级石漠化样地的相对湿度全天变化相差甚大(图 4),强度、中度石漠化地区相对湿度变幅最大,夏/冬季平均都达到近 50%;轻度石漠化地区次之,潜在石漠化地区相对湿度的变幅最小。说明不同等级的石漠化小生境其相对湿度确实存在着明显差异的同时,由于潜在石漠化的样地森林树木多,森林的阻挡作用降低了风速,也减弱了湍流作用,使林冠内灌丛和土壤在中午高温时段蒸发出来的水汽较长的停留在林内空气中,增加了空气湿度。植被稀少的中强度石漠化地区因接受的太阳辐射多,湍流交换强烈,风速大,相对湿度总体上小于轻度石漠化地区和潜在石漠化地区。

3.3 土壤含水量特征

土壤含水量的日变化虽较小,但从表 4 可以看

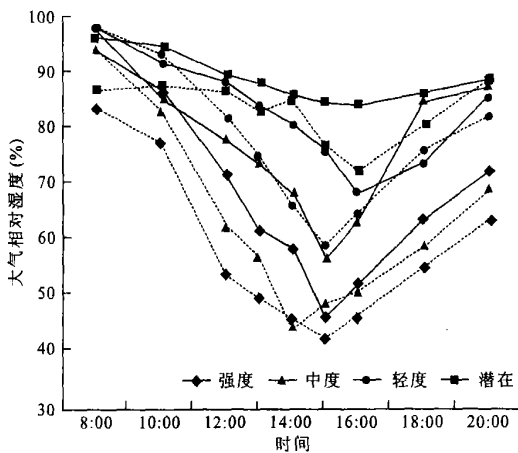


图 4 不同石漠化等级代表性样地夏/冬季晴天大气相对湿度日动态

Fig. 4 Daily variation of air relative humidity in representative sample plots with different karst rocky desertification degrees (summer/winter)

出,各石漠化等级样地的土壤含水量的变化规律。潜在石漠化和轻度石漠化地区土壤含水量日变化情况在短时间尺度上表现不明显,而中度和强度石漠化地区可以表现出明显的失水过程,即早晨 > 中午 > 傍晚,这也表明了喀斯特石漠化地区植被对土壤水分丢失的调节作用。另外,在各石漠化等级中,呈现潜在、轻度的土壤含水率高,强度、中度的土壤含水率低的趋势。

表 3 不同石漠化等级样地土层(0~30 cm)夏季含水率(%干土)/土层储水量(0~30 cm)(mm)日变化均值
Tab.3 Diurnal variations of the mean values of soil water content (0~30 cm) (%dry soil) / soil water storage (0~30 cm) (mm) in sample plots with different karst rocky desertification degrees in summer

石漠化等级	土壤深度 (cm)	早 (8:00~9:00)	午 (13:00~14:00)	晚 (18:00~19:00)
潜在石漠化	0~5	45.28/19.43	48.18/20.50	49.74/21.04
	5~10	42.71/18.21	46.42/18.42	47.51/19.83
	10~20	43.19/39.39	45.38/39.96	44.47/38.74
	20~30	36.67/32.8	42.73/38.82	42.29/37.16
轻度石漠化	0~5	46.83/21.02	38.67/17.56	45.17/20.52
	5~10	46.57/21.05	42.37/19.19	45.09/20.67
	10~20	46.85/48.21	43.44/45.01	42.80/42.11
	20~30	38.82/42.11	37.52/40.68	40.69/44.23
中度石漠化	0~5	38.14/17.65	35.06/16.24	32.07/15.15
	5~10	41.04/18.95	39.79/20.75	35.15/16.61
	10~20	39.79/20.75	39.18/42.20	38.84/41.45
	20~30	36.92/41.12	36.05/40.85	36.28/40.79
强度石漠化	0~5	41.96/19.25	42.62/19.66	40.73/18.84
	5~10	49.86/22.79	41.49/19.14	42.09/19.29
	10~20	50.19/50.23	45.59/45.62	44.74/44.51
	20~30	49.55/50.69	43.37/43.20	45.49/44.90

4 讨论

4.1 海拔高度的影响

综合观察各石漠化等级样地间各小气候指标,照度、温度、气压除受石漠化等级梯度的影响外,受海拔高度的影响同样显著。各指标随海拔高度的变化除潜在石漠化由于本身植被郁闭度高,缓冲作用大而变化较小外;轻度石漠化、中度石漠化和强度石漠化的光照强度与海拔的关系是极其明显的,如轻度石漠化样地的 4 个样点由于其坡向基本上以北坡和西北坡为主,所以其早晨(8:00)的光照强度随着海拔的升高而增大;中度石漠化和强度石漠化也是类似的情况。流域海拔高差约 200 m,温度、气压呈现随海拔升高而降低的趋势。因此,本文在探讨小气候对石漠化梯度的响应时,除受当地降水、土壤质地和小地形影响更为显著的土壤湿度外,其余各指标均针对相同海拔石漠化等级梯度的代表性样地进行讨论。

4.2 石漠化环境梯度的小气候响应

研究表明,地面光照强度随着石漠化等级的增强而增强;中、强度石漠化区由于基岩裸露率高,土壤极少,多为石缝土,生境干旱,加之植被覆盖度低,受太阳直射时间长,白天岩面温度很高,夜间散热快,昼夜温差变化大;潜在石漠化和轻度石漠化地区对空气和土壤的保温、保湿作用是相当明显的,森林在其小气候变化过程中有着重要的生态调节作用。石漠化程度的不同直接导致小环境的差异,影响植物的生长发育,并带来了一系列植物生态适应性的表征。

强度石漠化植被稀疏、郁闭度小,群落改善小气候的能力差。由于缺乏上层植被的缓冲,空气相对湿度低,日平均相对湿度夏季为 76%,冬季仅为 51%。土壤水分总体表现为中、强度石漠化土壤含水率低于轻、潜在石漠化等级,由于该区地处中亚热带河谷地带,热量条件优越,使得水分成为该区,尤其是中强度石漠化植物生长的限制因子。研究表明,该地区石漠化一旦发生,由于植被覆盖率的下降,其植被的生态调节作用也会严重退化,4 种石漠化等级样地对环境调蓄能力的顺序是:潜在石漠化 > 轻度石漠化 > 中度石漠化 > 强度石漠化。

参考文献

[1] 马友鑫,刘玉洪,张克映. 1998. 西双版纳热带雨林片断小气

- 候边缘效应的初步研究[J]. 植物生态学报, 22(3):250~255.
- [2] 王世杰. 2002. 喀斯特石漠化概念演绎及其科学内涵的探讨[J]. 中国岩溶, 21(2):101~105.
- [3] 王正菲, 朱廷曜, 朱劲伟, 等. 1985. 森林气象学[M]. 北京: 中国林业出版社.
- [4] 甘天箴, 穆 彪. 1987. 茂兰喀斯特森林气候考察报告[A]. 见: 周政贤. 茂兰喀斯特森林科学考察集[C]. 贵阳: 贵州人民出版社, 98~109.
- [5] 任 海, 彭少麟. 2002. 恢复生态学导论[M]. 北京: 科学出版社.
- [6] 刘文杰, 李庆军, 张光明, 等. 2000. 西双版纳望天树林干热季不同林窗间的小气候差异[J]. 生态学报, 20(6):932~937.
- [7] 刘树华, 辛国君, 陈荷生, 等. 1994. 沙漠人工植被和流动沙丘的小气候特征观测研究[J]. 干旱区地理, 17(1):16~22.
- [8] 向悟生, 李先琨, 吕仕洪, 等. 2004. 广西岩溶植被演替过程中主要小气候因子日变化特征[J]. 生态科学, 23(1):25~31.
- [9] 朱守谦. 2002. 喀斯特森林生态研究[M]. 贵阳: 贵州科技出版社, 3~9.
- [10] 张邦琨, 韦小丽, 曾信波. 1995. 喀斯特地貌森林不同小生境的小气候特征研究[J]. 贵州气象, 4:16~19.
- [11] 张忠义. 1996. 生物资源抽样调查技术[M]. 北京: 气象出版社, 263~279.
- [12] 李援越, 朱守谦, 祝小科. 2002. 黔中退化喀斯特群落自然恢复生态学过程研究[A]. 见: 朱守谦. 喀斯特森林生态研究[C]. 贵阳: 贵州科技出版社.
- [13] 李援越, 穆 彪, 祝小科, 等. 1998. 喀斯特森林不同演替阶段群落的小气候特征[J]. 山地农业生物学报, 17(6):364~367.
- [14] 杨明德. 1988. 论喀斯特地貌地域结构及其环境效应[M]. 贵阳: 贵州人民出版社.
- [15] 常 杰, 潘晓东. 1999. 青冈常绿阔叶林内的小气候特征[J]. 生态学报, 19(1):6~11.
- [16] 黄小澜, 丁瑞兴. 1991. 亚热带秋林区茶林复合系统小气候特征的研究[J]. 生态学报, 11(1):7~12.
- [17] 傅抱璞. 1983. 山地气候[M]. 北京: 科学出版社.
- [18] 熊志斌, 冉景丞, 谭成江, 等. 2003. 濒危植物掌叶木种子生态特征[J]. 生态学报, 23(3):820~825.
- [19] 熊康宁, 黎 平, 周忠发, 等. 2002. 喀斯特石漠化的遥感—GIS典型研究——以贵州省为例[M]. 北京: 地质出版社.
- [20] 臧润国. 2002. 海南热带山地雨林森林循环不同阶段光、温环境的测定与分析[J]. 北京林业大学学报, 24(5/6):125~130.
- [21] 萨鲍日尼科娃. 周思济等译. 1955. 小气候与地方气候[M]. 北京: 科学出版社.
- [22] Amrita G, de Soya, Walter GW, Jeffrey EH, et al. 1998. Early warning indicators of desertification examples of tests in the Chihuahuan Desert[J]. J. Arid Environ., 39:101~112.
- [23] Wang SJ, Li RL, Sun CX, et al. 2004. How types of carbonate rock assemblages constrain the distribution of karst rocky desertified land in Guizhou Province, P. R. China: Phenomena and mechanisms[J]. Land Degrad. Dev., 15:123~131.

作者简介 容 丽,女,1973年生,博士研究生,从事岩溶生态和地球化学研究。E-mail: wangshijie@vip.skleg.cn
责任编辑 李凤芹