

王佳, 李生, 郑艳红, 等. 石漠化区两种下垫面小气候日动态效应[J]. 中国岩溶, 2024, 43(4): 810-821, 853.

DOI: 10.11932/karst2024y023

石漠化区两种下垫面小气候日动态效应

王佳^{1,2}, 李生^{1,2}, 郑艳红¹, 潘雯¹, 孙彦¹

(1. 中国林业科学研究院亚热带林业研究所, 浙江 杭州 311400; 2. 贵州普定石漠化生态系统
国家级定位观测研究站, 贵州 普定 562100)

摘要: 为探究石漠化区异质化下垫面小气候效应, 以安顺市普定县石灰岩分布区两种典型下垫面(土面、裸地)为研究对象, 通过模拟试验开展近地表温、湿度日动态变化长期定量对比分析。结果表明: 在时空尺度上, 土面、裸地下垫面小气候日动态分异显著, 表现为夏季太阳辐射最强时, 土面各空间高度气温显著高于裸地($P<0.05$), 相对湿度显著低于裸地($P<0.05$), 引发增温、减湿效应; 冬季10:00—16:00时, 土面下层气温显著低于裸地($P<0.05$), 相对湿度显著高于裸地($P<0.05$), 产生降温、增湿效应。受季节性影响, 土面、裸地小气候日变化程度差异显著, 表现为夏季土面上层气温日较差显著高于裸地($P<0.05$), 加剧气温日变化; 冬季土面下层温度、湿度日较差显著低于裸地($P<0.05$), 缓冲小气候日变化。相较于裸地, 土面小气候条件更为严酷、多变。结合异质化下垫面小气候效应差异, 改善局部小气候条件, 对缓冲石漠化区小气候变化及加快植被生态恢复进程具有积极作用。

关键词: 石漠化; 下垫面; 小气候; 温湿度; 植被恢复

创新点: 基于长周期日动态数据, 从不同垂直空间水平定量对比分析贵州省安顺市普定县石漠化区两种典型下垫面(土面、裸地)近地小气候特征, 提出当前基岩裸露区处于夏季干热且趋于剧烈、冬季湿冷且趋于缓和的小气候变化背景这一观点, 弥补了国内外在石漠化非均匀性下垫面小气候效应定量研究的不足, 并建议优先引入早期速生岩溶植物以改善局部小气候条件。

中图分类号: X171; P463.2 文献标识码: A

文章编号: 1001-4810(2024)04-0810-12

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



0 引言

陆地生态系统下垫面性质, 如地形、土地利用方式、植被覆盖等, 对陆气相互作用具有重要影响^[1-2]。不同类型下垫面通过改变地表与上覆大气之间的水、热交换过程, 造成地表水汽和能量分配差异, 引发局部近地层小气候差异^[3-4]。有研究表明, 小气候对陆地生态系统的结构、功能及过程产生重要影响, 是植物响应全球气候变化的关键驱动因子^[5-6]。此外, 由下垫面引发的小气候差异反作用于大气环流, 对局

地乃至全球尺度地气系统物质、能量平衡及气候变化具有重大意义^[7-8]。

岩溶地貌是陆地生态系统的重要组成部分, 占全球陆地面积的12%~15%。在湿热季风气候影响下, 出露地表的碳酸盐岩发生强烈溶蚀, 发育石面、石缝、石沟、石槽、石洞、石坑、土面等多种异质化下垫面, 构成独特的岩溶生态系统^[9-10]。由于长期人类活动和极端气候频发, 露石生态系统发生严重退化, 形成土壤侵蚀、植被退化或灭绝等石漠化景观^[11-12]。随石漠化发展, 植被对环境的调蓄能力减弱, 生态系统

基金项目: 国家自然科学基金青年项目(32101597); 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金项目(CAFYBB2020SY017)

第一作者简介: 王佳(1987—), 男, 助理研究员, 博士, 主要研究方向: 脆弱生态系统植被恢复。E-mail: vipmzone0601@126.com。

通信作者: 李生(1976—), 男, 研究员, 硕士研究生导师, 主要研究方向: 石漠化生态防治。E-mail: lnlyls@163.com。

收稿日期: 2023-07-14

越发脆弱,局部小气候易产生剧烈冷暖、干湿趋势变化,极不利于生态系统的重建^[13-14]。植被恢复是石漠化生态防治的核心问题之一,其解决离不开环境的作用^[15]。然而,当前石漠化区环境要素研究多侧重于土、水等方面^[16-17],对气的研究相对薄弱。有研究指出开展小尺度气候效应研究对石漠化区生物多样性保护及应对全球气候变化至关重要^[18]。目前,围绕石漠化区小尺度均匀性下垫面(如出露地表的基岩)小气候研究已取得一些初步共识,主要包括裸岩对上方空间的加热效应^[19]及对侧向空间的荫蔽作用^[20-21]。然而,当岩体内部发育有凹状(土面)、沟状(石沟、石缝)或槽状(石槽)微生境时^[9,22],这类非均匀性下垫面对内部空间小气候将产生何种效应仍鲜见报道。因此,本研究以贵州省安顺市普定县石灰岩分布区两种典型下垫面(土面、裸地)为研究对象,采用模拟试验,基于长周期日动态监测数据,在近地表垂直空间水平上开展两种下垫面内部空气温湿度定量对比分析,系统认识两种下垫面小气候日动态变化规律,明确两种下垫面小气候日动态效应差异,以期对石漠化生态防治提供科学参考。

1 研究区概况

研究区位于贵州省安顺市普定县。普定县总面积 1 091 km²,处于云贵高原东侧斜坡地带,地势由南、北部向中部乌江南源三岔河河谷倾斜,海拔为 1 042~1 846 m。全县岩溶发育强烈,地貌类型多样,岩溶区占全县面积的 84.27%,石漠化率达 60.55%。研究区属北亚热带高原季风湿润气候,年日照时数 1 165 h,无霜期有 301 d;年平均气温 15.1 ℃,最热月(7月)平均气温 22.3 ℃,最冷月(1月)平均气温 5.2 ℃;年降雨量达 1 378.2 mm,主要集中于 5~10月,雨热同期

典型;年太阳总辐射量在 85.71(12月)~458.81 MJ·m⁻²(9月)范围波动,呈季节性倒 U 型分布;年水面蒸发与降雨呈同步变化趋势,空气相对湿度波动范围为 81.35%~94.56%(图 1)。春季、夏季、秋季的太阳辐射峰值分别为冬季的 1.29、1.54 和 1.10 倍;全年水面蒸发呈不规则波动,峰值夏季>秋季>春季>冬季(图 2)。全县 98% 以上地区属长江流域,以石灰土为主,同时分布有黄壤和水稻土。截止 2021 年,普定县总人口有 37.63 万人,人口密度近 345 人·km⁻²。

土面、裸地是石灰岩石漠化地区两种常见下垫面^[9,23]。两者生境差异在于,土面为基岩裸露区一种常见的土地类型,由出露地表的多边形岩体及分布于内部的斑块土壤组成,属于非均匀性下垫面;裸地为无岩石出露地表、无植被覆盖的正常土地,属于均匀性下垫面。在下垫面小气候效应研究中,裸地可作为土面的理想对照。此外,土面在生源要素上具有优势性,土层厚(20~80 cm)且有机碳含量高,利于植物定居、生长^[24-25]。

2 研究方法

2020 年 10 月于普定县坪上镇和平村重度石漠化坡地(105°72'E, 26°40'N, 海拔 1 331 m, 坡度 21°)选择 30 个典型的土面小生境,分别测定多边形岩石高度、厚度、埋深及内部土壤斑块长度和宽度,并对各参数取平均值。岩体平均高度为 79.67±4.35 cm,岩体平均厚度为 26.53±2.44 cm,岩体平均埋深为 59.7±0.77 cm;土壤斑块平均长度为 126.7±4.41 cm,土壤斑块平均宽度为 118.87±4.09 cm。以土面的各参数平均值为基准,于贵州普定石漠生态系统国家定位观测研究站一处开放平地(105°76'E, 26°28'N, 海拔 1 310 m, 坡度 6°),采用原位石灰石+混凝土浇

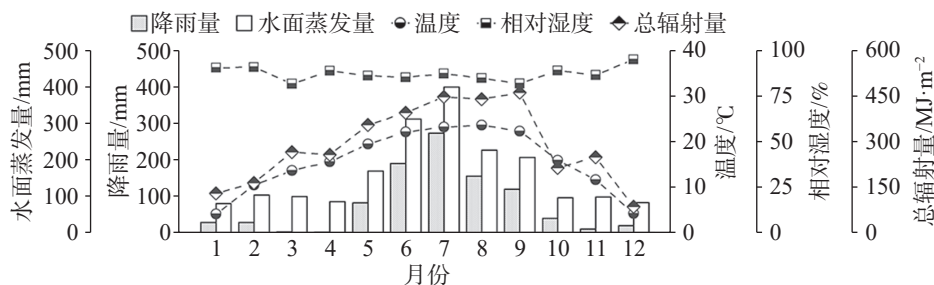


图1 研究区空气温度、相对湿度、总辐射、降雨及水面蒸发月动态

Fig. 1 Monthly dynamics of average air temperature, relative humidity, total radiation, precipitation and water surface evaporation in the study area

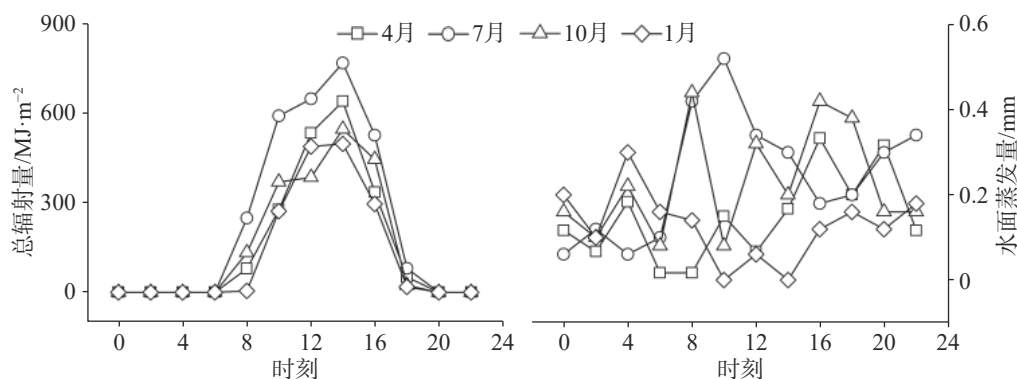


图2 研究区不同月份大气总辐射及水面蒸发日动态

Fig. 2 Daily dynamics of total radiation and water surface evaporation in the study area

筑技术^[19]模拟构建3处开口朝南的土面,同时选取3处裸地,各下垫面间隔3 m(图3)。该观测站站区发育有典型埋藏型石灰岩地貌,开展模拟试验是为降低因野外岩体形状、大小、朝向等参数变异引起的随机误差,以提高观测结果的可靠性和准确性,同时保障监测设备安全运行。



图3 裸地(a)、土面(b)试验设计示意图

Fig. 3 Schematic diagram of experimental design in bare land (a) and earth flatland (b)

在距离裸地(对照)、土面地表几何中心向上2 cm(下层)、40 cm(中层)、80 cm(上层)处分别安置高分辨率iButton DS1923温湿度记录仪(Maxim Integrated Device, California, USA)测定不同空间高度的气温和相对湿度(图3)。记录仪温度范围在-10~65℃之间,分辨率为0.0625℃,相对湿度范围在0%~100%之间,分辨率为0.04% RH(<https://www.ibutton.com>)。在裸地距离地面1.6 m处安置RR-9170环境自动监测系统(北京雨根科技有限公司,中国),测定大气温湿度、降雨量、太阳总辐射、水面蒸发等数据。所有监测记录设备数据存储间隔设置为2 h,连续观测,定期读取和下载数据。

依据中国气象学四季划分法^[26],将2-5月划分为春季,6-9月为夏季,10-11月为秋季,12月至翌年1月为冬季(图1)。4、7、10、1月份分别为春、夏、秋、

冬的代表月份。为减少降雨、风等因素的影响,选取2021年全年数据中不同季节代表月份中5个晴天(无降雨,风力≤2级)的观测数据进行统计分析。

数据采用Origin 2021(<http://www.originlab.com>)、R 4.2.3(<http://www.R-project.org>)分别进行绘图及统计分析。tapply、bartlett.test/var.test函数用于数据正态性、方差齐性检验。若数据通过检验,采用单因素方差分析(One-way ANOVA)对不同空间高度空气温湿度进行多重比较,采用独立样本t检验(Two sample t-test)对土面、裸地同一空间高度空气温湿度进行比较分析;若未通过检验,多组数据通过kruskal.test函数、PMCMRplus包进行非参数检验及多重比较,两组数据使用wilcox.test函数进行wilcoxon秩和检验。

3 结果与分析

3.1 两种下垫面气温日动态变化

裸地、土面不同空间高度气温日动态呈倒U型分布(图4)。4、7、10月裸地、土面各空间高度随太阳辐射于8:00开始同步增温,1月则延迟2 h。4、7、10月裸地、土面增温峰值出现于14:00,与太阳辐射峰值出现时间一致,10月裸地下层增温峰值则延迟2 h。4、7、10、1月裸地下层气温最高,分别为37.06、39.53、42.29、29.22℃。4、7和10月土面下层气温最高,分别为41.42、43.20和37.57℃,1月中层气温最高(23.78℃)。不同月份裸地下层增温快于中层和上层,除4月外土面各空间高度增温未呈现相似趋势。不同月份裸地、土面各空间高度于14:00开始降温,次日6:00降至最低。不同月份裸地下层降

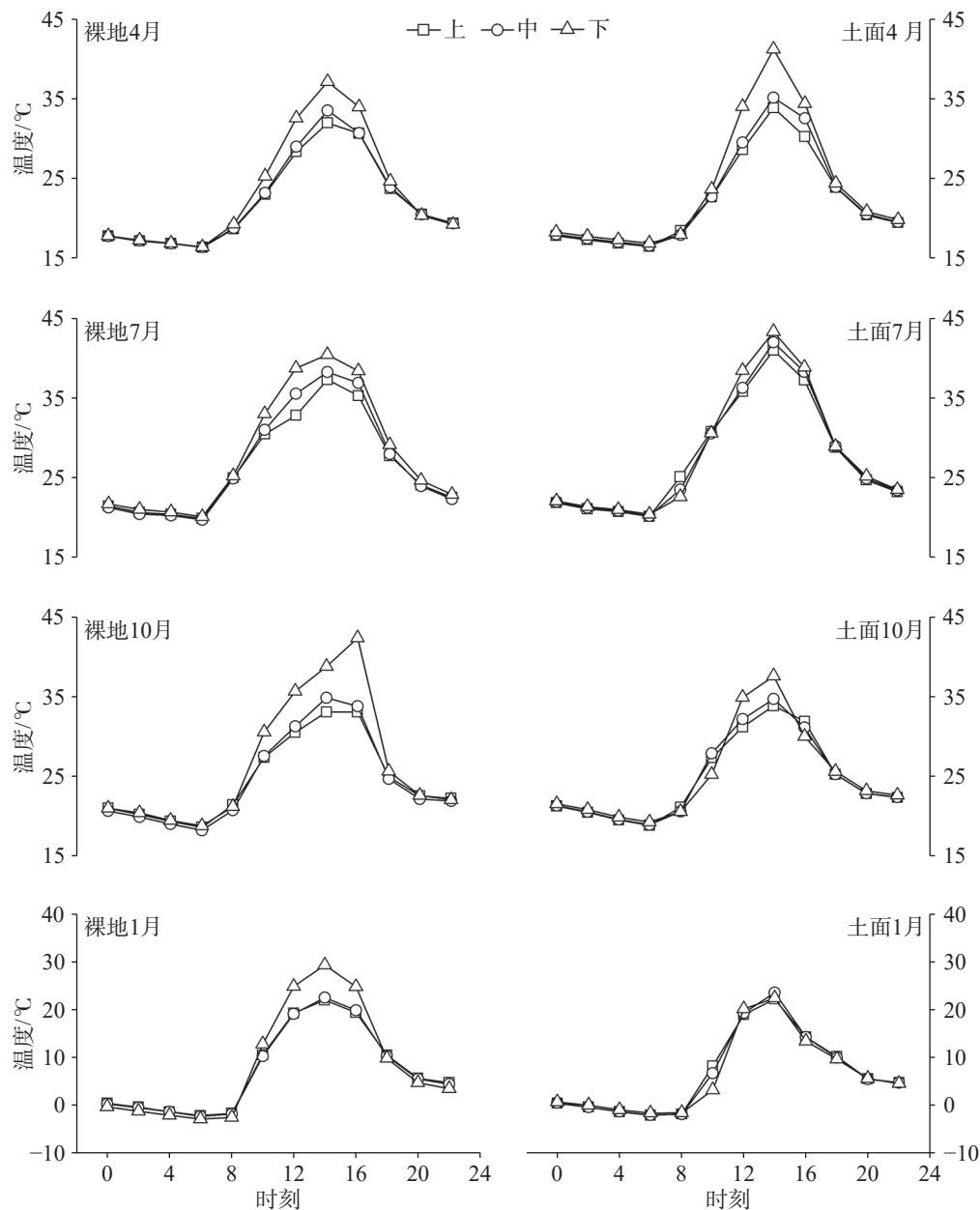


图4 不同月份两种下垫面不同空间高度平均气温日动态

Fig. 4 Daily dynamics of average air temperatures at different spatial heights of two underlying surfaces in different months

温快于中层和上层; 4、7、10月 14:00—16:00 土面下层降温快于中层和上层, 但 1月土面不同空间高度降温速率差异不明显。

不同月份 8:00—18:00 裸地、土面各空间高度气温差异显著性见表 1。7月, 12:00、18:00 裸地下层气温显著高于上层($P<0.05$), 8:00 土面上层气温显著高于中层、下层($P<0.05$); 8:00 裸地中、下层气温显著高于土面($P<0.05$), 14:00 土面各空间高度气温均显著高于裸地($P<0.05$)。10月, 14:00 裸地下层气温显著高于上层($P<0.05$), 16:00 下层气温显著高于中层、上层($P<0.05$); 10:00 裸地下层气温显著高于土面

($P<0.05$), 16:00 裸地中、下层气温显著高于土面($P<0.05$)。1月, 10:00—16:00 裸地下层气温显著高于中、上层($P<0.05$), 10:00 土面中、上层气温显著高于下层($P<0.05$); 10:00、16:00 裸地各空间高度气温均显著高于土面($P<0.05$), 12:00、14:00 裸地下层气温显著高于土面($P<0.05$)。

夏季典型晴天, 当太阳辐射发生时, 土面中、下层气温低于裸地, 表明土面岩体对中、下层具有降温效应。太阳辐射达到峰值时, 土面各空间高度气温均高于裸地, 表明土面岩体对其内部空间具有显著加热效应。在冬季典型晴天, 随着太阳辐射逐渐增

表 1 不同月份 8:00—18:00 时两种下垫面各空间高度气温显著性差异 (℃)
Table 1 Significant differences of air temperature at different spatial heights of two underlying surfaces from 8:00 to 18:00 in different months (℃)

月份	时刻	下垫面类型					
		裸地			土面		
		上层	中层	下层	上层	中层	下层
4	8:00	18.62±1.72Aa	18.74±1.69 Aa	19.22±1.73 Aa	18.54±1.61 Aa	18.04±1.66 Aa	18.08±1.72 Aa
	10:00	22.96±2.17Aa	23.10±2.16 Aa	25.20±2.66 Aa	22.82±2.02 Aa	22.86±2.03 Aa	23.76±2.18 Aa
	12:00	28.26±3.24 Aa	28.90±3.35 Aa	32.48±4.00 Aa	28.78±3.32 Aa	29.68±3.43 Aa	34.18±4.43 Aa
	14:00	31.88±1.75 Aa	33.42±2.24 Aa	37.06±2.46 Aa	34.04±1.92 Aa	35.30±2.28 Aa	41.42±3.35 Aa
	16:00	30.56±2.89 Aa	30.62±2.95 Aa	33.86±3.44 Aa	30.40±2.72 Aa	32.72±3.28 Aa	34.54±3.69 Aa
	18:00	23.68±1.92 Aa	23.82±1.97 Aa	24.58±2.09 Aa	24.02±1.92 Aa	24.06±1.90 Aa	24.54±1.89 Aa
7	8:00	24.88±0.28 Aa	24.82±0.37 B a	25.14±0.38 B a	24.96±0.29 A B	23.38±0.31 Aa	22.46±0.32 Aa
	10:00	30.38±1.22 Aa	30.91±1.00 Aa	32.92±1.32 Aa	30.64±0.75 Aa	30.41±0.73 Aa	30.44±0.78 Aa
	12:00	32.72±0.91 Aa	35.41±1.42 Aab	38.65±2.06 A B	35.69±1.47 Aa	36.16±1.47 Aa	38.32±1.67 Aa
	14:00	37.22±0.83 Aa	38.15±1.17 Aa	39.53±0.53 Aa	40.85±0.85 B a	41.88±0.98 B a	43.20±0.67 B a
	16:00	35.20±1.39 Aa	36.80±1.58 Aa	38.29±1.61 Aa	37.15±1.62 Aa	38.15±1.68 Aa	38.74±1.18 Aa
	18:00	27.68±0.29 Aa	27.88±0.31 Aab	29.04±0.40 A B	28.68±0.54 Aa	28.84±0.59 Aa	28.78±0.43 Aa
10	8:00	21.43±0.18 Aa	20.82±0.32 Aa	21.24±0.44 Aa	21.16±0.27 Aa	20.64±0.60 Aa	20.61±0.61 Aa
	10:00	27.40±1.23 Aa	27.55±1.18 Aa	30.56±1.75 B a	27.33±1.03 Aa	27.89±1.26 Aa	25.26±0.34 Aa
	12:00	30.51±1.66 Aa	38.65±2.06 Aa	35.60±2.23 Aa	31.17±1.75 Aa	32.19±1.95 Aa	34.89±2.63 Aa
	14:00	33.04±0.98 Aa	34.84±1.12 Aab	38.70±1.11 A B	33.85±1.10 Aa	34.70±1.13 Aa	37.57±1.43 Aa
	16:00	33.05±0.75 Aa	33.78±0.72 B a	42.29±0.99 B b	31.89±0.72 Aa	31.15±0.71 Aa	29.98±0.55 Aa
	18:00	24.93±0.42 Aa	24.69±0.48 Aa	25.63±0.38 Aa	25.30±0.37 Aa	25.31±0.36 Aa	25.66±0.40 Aa
1	8:00	-1.66±1.00 Aa	-1.80±0.90 Aa	-2.56±0.72 Aa	-1.58±0.87 Aa	-1.64±0.83 Aa	-1.30±0.74 Aa
	10:00	10.54±0.52 B a	10.24±0.51 B a	12.74±0.45 B b	8.42±0.55 A B	6.94±0.72 A B	3.46±0.66 Aa
	12:00	19.24±0.63 Aa	19.10±0.62 Aa	24.74±0.64 B b	19.20±0.77 Aa	19.54±0.66 Aa	20.38±0.40 Aa
	14:00	21.94±0.87 Aa	22.48±0.90 Aa	29.22±0.81 B b	22.42±0.81 Aa	23.78±0.79 Aa	22.64±0.71 Aa
	16:00	19.38±0.96 B a	19.84±0.94 B a	24.68±0.93 B b	14.52±0.84 Aa	14.48±0.84 Aa	13.62±0.95 Aa
	18:00	10.42±1.12 Aa	10.28±1.18 Aa	9.76±1.13 Aa	10.38±1.10 Aa	10.22±1.10 Aa	9.86±1.07 Aa

注: 数据为平均值±标准误差, 加粗且有边框的字母代表存在显著性差异 ($P<0.05$)。不同大写字母表示同一空间高度裸地和土面之间差异显著 ($P<0.05$), 不同小写字母表示同一下垫面各空间高度差异显著 ($P<0.05$)。表1和表2同理。

Note: Data are mean ± standard error. Boxed bold letters indicate significant differences ($P<0.05$). Uppercase letters indicate significant differences ($P<0.05$) between bare land and soil surface at the same spatial height. Lowercase letters indicate significant differences ($P<0.05$) at different spatial heights of the same underlying surface (hereinafter the same in Table 1 and Table 2).

强, 土面下层气温低于裸地, 表明土面岩体对下层具有降温效应。

3.2 两种下垫面空气相对湿度日动态变化

裸地、土面不同空间高度空气相对湿度日动态呈 U 型分布(图 5)。4、7、10 月裸地、土面各空间高度相对湿度于 6:00 达到峰值, 1 月则延迟 2 h。4、7、10 和 1 月裸地各空间高度相对湿度日最大值依次出现在下层(94.32%)、中层(97.59%)、中层(96.28%)和下层(100%); 土面相对湿度日最大值依次出现在上层(92.44%)、上层(95.57%)、上层(92.01%)和下

层(99.02%)。随太阳辐射增强, 裸地、土面各空间高度相对湿度逐渐下降, 14:00 至最低值。随后太阳辐射逐渐减弱, 裸地、土面各空间高度相对湿度缓慢上升, 次日 6:00-8:00 至最大值。4、7、10 月裸地、土面相对湿度日最小值均出现在下层。1 月裸地相对湿度日最小值均出现在下层, 土面则出现在中层。4 月裸地、土面相对湿度日最小值分别为 31.96%、25.56%, 7 月为 36.20%、29.67%, 10 月为 33.89%、33.67%, 1 月为 22.00%、25.58%。

不同月份 8:00-18:00 裸地、土面各空间高度空气相对湿度差异显著性见表 2。7 月 14:00 裸地各空

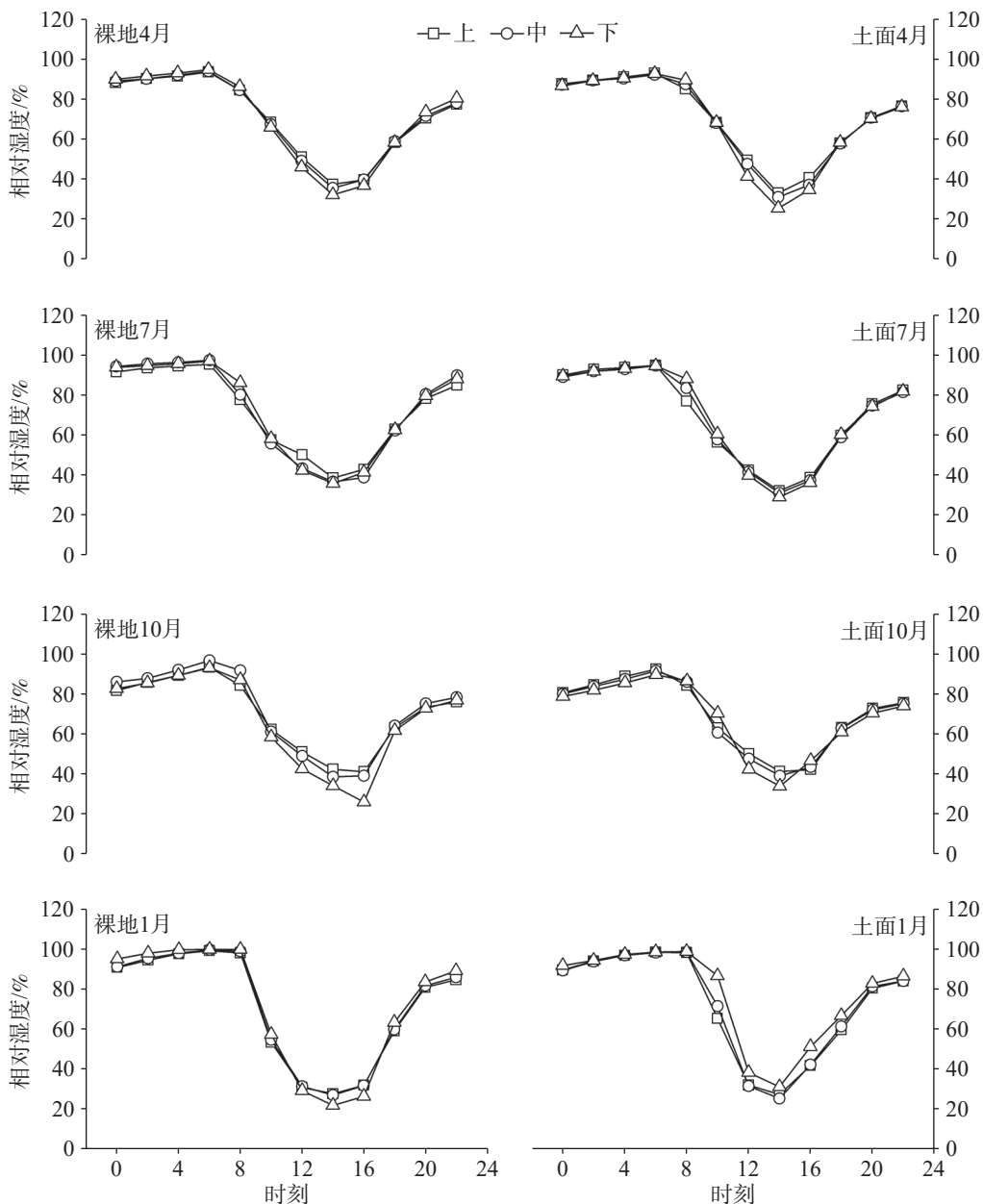


图5 不同月份两种下垫面不同空间高度平均相对湿度日动态

Fig. 5 Daily dynamics of average relative humidity at different spatial heights of two underlying surfaces in different months

间高度相对湿度均显著高于土面($P<0.05$)。10月8:00裸地中层相对湿度显著高于上层($P<0.05$), 16:00裸地中、上层相对湿度显著高于下层($P<0.05$), 10:00、16:00土面下层相对湿度显著高于裸地($P<0.05$)。1月10:00土面下层相对湿度显著高于中层、上层($P<0.05$), 10:00、16:00土面各空间高度相对湿度显著高于裸地($P<0.05$), 12:00、14:00土面下层相对湿度显著高于裸地($P<0.05$)。

夏季典型晴天,当太阳辐射最强时,土面各空间高度相对湿度低于裸地,表明土面岩体对内部空间具有减湿效应。在冬季典型晴天,随太阳辐射增强,

土面下层相对湿度高于裸地,表明土面岩体对其内部下层空间具有增湿效应。

3.3 两种下垫面空气温湿度日较差

不同月份裸地、土面内部空间不同高度气温及相对湿度日较差差异显著性见表3。不同月份裸地、土面中层、上层气温日较差表现为冬季高,春、秋季低;土面下层则为春季高,秋季低。不同月份裸地、土面相对湿度日较差表现为冬季高,春、秋季低。7月典型晴天土面上层气温日较差显著高于裸地($P<0.05$);10月裸地下层气温日较差显著高于中层、

表 2 不同月份 8:00—18:00 时两种下垫面各空间高度相对湿度 (%) 显著性差异
Table 2 Significantly differences of air relative humidity (%) at different spatial heights of two underlying surfaces
from 8:00 to 18:00 in different months

月份	时刻	类型					
		裸地			土面		
		上层	中层	下层	上层	中层	下层
4	8:00	84.04±4.39 Aa	84.02±4.51 Aa	85.84±4.15 Aa	84.68±3.97 Aa	87.10±3.44 Aa	89.10±3.45 Aa
	10:00	67.94±7.69 Aa	67.10±7.78 Aa	65.48±7.84 Aa	67.98±6.52 Aa	67.84±6.65 Aa	68.06±7.19 Aa
	12:00	50.70±9.78 Aa	48.82±10.04 Aa	45.62±11.34 Aa	49.26±9.75 Aa	47.60±9.90 Aa	41.30±11.22 Aa
	14:00	37.16±4.48 Aa	35.20±5.01 Aa	31.96±5.91 Aa	33.08±4.61 Aa	31.08±4.79 Aa	25.56±6.34 Aa
	16:00	39.32±7.18 Aa	39.44±7.35 Aa	36.50±8.17 Aa	40.58±7.43 Aa	37.20±8.51 Aa	34.56±9.09 Aa
	18:00	57.92±6.63 Aa	58.6±5.80 Aa	57.86±6.23 Aa	57.78±6.34 Aa	57.56±5.86 Aa	58.10±5.77 Aa
7	8:00	77.92±2.90 Aa	80.44±5.48 Aa	86.51±5.82 Aa	77.57±3.24 Aa	84.22±3.10 Aa	88.75±3.47 Aa
	10:00	57.77±3.71 Aa	56.13±3.68 Aa	58.50±4.00 Aa	57.07±2.56 Aa	58.52±2.93 Aa	61.28±4.54 Aa
	12:00	50.46±2.33 Aa	43.54±3.18 Aa	42.71±4.28 Aa	43.16±3.64 Aa	42.31±3.67 Aa	40.60±4.30 Aa
	14:00	38.94±2.01 B _a	37.80±1.92 B _a	36.20±1.54 B _a	32.91±1.10 Aa	31.72±1.48 Aa	29.67±1.41 Aa
	16:00	43.12±2.55 Aa	39.24±2.58 Aa	41.76±2.12 Aa	39.49±2.17 Aa	38.12±2.90 Aa	37.07±2.50 Aa
	18:00	63.17±2.48 Aa	62.60±2.53 Aa	62.97±2.59 Aa	60.44±2.04 Aa	59.71±1.71 Aa	60.89±2.59 Aa
10	8:00	83.81±1.17 Aa	91.42±2.66 A _b	86.68±1.64 Aab	83.98±1.12 Aa	85.82±2.18 Aa	86.07±2.20 Aa
	10:00	62.05±4.00 Aa	60.94±4.10 Aa	58.21±4.29 Aa	62.74±3.24 Aa	60.36±4.18 Aa	70.06±0.70 B _a
	12:00	50.91±5.35 Aa	48.75±5.31 Aa	42.35±5.30 Aa	49.96±5.38 Aa	47.49±5.19 Aa	42.22±6.01 Aa
	14:00	42.22±2.58 Aa	38.52±2.64 Aa	33.89±2.34 Aa	41.03±2.86 Aa	38.83±3.14 Aa	33.67±3.20 Aa
	16:00	40.94±2.43 A _b	38.86±2.15 A _b	25.87±1.66 Aa	42.00±2.91 Aa	43.25±2.95 Aa	46.46±2.59 B _a
	18:00	62.95±2.85 Aa	63.86±2.82 Aa	61.40±2.76 Aa	62.83±2.78 Aa	62.65±2.65 Aa	60.76±2.75 Aa
1	8:00	98.32±1.08 Aa	99.12±0.68 Aa	100.00±0.00 Aa	98.66±1.03 Aa	98.98±1.02 Aa	99.02±0.58 Aa
	10:00	53.50±2.22 Aa	54.78±2.53 Aa	57.48±2.28 Aa	65.62±2.74 B _a	71.70±3.83 B _a	86.92±3.12 B _b
	12:00	30.94±2.49 Aa	31.52±2.26 Aa	29.44±2.34 Aa	32.26±2.28 Aa	31.74±2.05 Aa	38.52±2.25 B _a
	14:00	27.80±2.38 Aa	27.16±2.46 Aa	22.00±1.75 Aa	27.62±2.06 Aa	25.58±2.08 Aa	31.48±2.27 B _a
	16:00	32.14±2.96 Aa	31.94±2.69 Aa	26.48±2.16 Aa	42.00±2.50 B _a	42.54±2.21 B _a	51.52±2.88 B _a
	18:00	59.22±3.30 Aa	59.86±3.25 Aa	63.58±3.81 Aa	59.84±3.20 Aa	61.60±2.94 Aa	66.98±3.02 Aa

上层($P<0.05$); 1 月裸地下层空气温度、湿度日较差显著高于土面($P<0.05$)。在夏季典型晴天, 土面上层气温日波动剧烈, 说明土面岩体加剧了上层气温日变化。冬季典型晴天, 土面下层气温、湿度波动平缓, 表明土面岩体对下层小气候日变化具有缓冲效应。

4 讨 论

与东亚极端干旱区类似, 石漠化区被认为是荒漠生态系统的重要组成部分, 对全球气候变化表现出高度敏感性^[19,27]。在气候、地质(地上、下二元结构)、人为(土地不合理利用)等因素长期作用下, 区域地表植被退化、大面积碳酸盐岩出露。这种下垫面特性的改变, 将对近地表层小气候造成深远影响^[28]。

截至目前, 有关石漠化区下垫面小气候效应的研究大多只选取夏季典型晴天特定时间段测定单一空间高度小气候要素, 且结果以定性描述为主^[22,29-31]。本研究独特之处在于, 基于长周期日动态数据, 在垂直空间水平定量对比分析了两种下垫面小气候效应。与裸地相比, 土面小气候日动态效应具有典型季节性特征, 即夏季的“加热”、“减湿”及“加剧”效应, 冬季的“降温”、“增湿”及“缓冲”效应。这一发现对于深入认识、掌握石漠化区局部气候变化规律及指导植被生态恢复的实践意义重大^[32-33]。

受季节性太阳辐射波动影响, 土面呈现明显不同的小气候日动态效应。夏季太阳辐射最强时干热化、冬季白天大部分时段趋于湿冷化, 这与土面下垫面岩体的物理特性密切相关^[19,34]。夏季日辐射最强

表 3 不同月份两种下垫面各空间高度气温及相对湿度日较差显著性差异
Table 3 Significantly differences of air temperature and relative humidity at different spatial heights of two underlying surfaces in different months

月份	要素	下垫面类型					
		裸地			土面		
		上层	中层	下层	上层	中层	下层
4	TR / °C	16.10±1.55 Aa	17.08±1.93 Aa	20.72±1.80 Aa	17.48±1.58 Aa	19.02±2.00 Aa	24.50±3.13 Aa
	RR / %	56.90±5.85 Aa	58.42±6.08 Aa	62.36±5.70 Aa	59.46±5.72 Aa	61.00±5.71 Aa	67.10±6.59 Aa
7	TR / °C	17.50±1.00 Aa	19.03±1.29 Aa	21.77±1.52 Aa	20.90±0.89 Ba	21.91±0.94 Aa	23.20±0.42 Aa
	RR / %	56.77±4.48 Aa	61.53±3.82 Aa	62.54±2.64 Aa	62.65±3.65 Aa	64.36±3.58 Aa	66.49±2.55 Aa
10	TR / °C	15.45±1.43 Aa	17.68±1.30 Aa	23.60±1.73 AB	15.86±1.40 Aa	16.47±1.62 Aa	19.63±2.03 Aa
	RR / %	53.26±5.72 Aa	59.92±4.52 Aa	66.79±4.26 Aa	53.10±5.38 Aa	53.32±5.33 Aa	56.80±5.55 Aa
1	TR / °C	24.26±0.74 Aa	24.92±0.83 Aa	32.28±0.85 BB	24.44±0.67 Aa	25.80±0.70 Aa	24.26±0.49 Aa
	RR / %	71.60±2.18 Aa	72.66±2.39 Aa	78.00±1.75 Ba	71.36±1.82 Aa	73.40±1.78 Aa	67.86±2.01 Aa

注：数据为平均值±标准误差，加粗且有边框的字母代表存在显著性差异($P<0.05$)。不同大写字母表示同一空间高度裸地和土面之间差异显著，不同小写字母表示同一下垫面各空间高度差异显著。TR(daily temperature range)表示气温日较差；RR(daily relative humidity range)表示相对湿度日较差。
Note: Data are mean ± standard error. Boxed bold letters indicate significant differences ($P<0.05$). Uppercase letters indicate significant differences between bare land and soil surface at the same spatial height. Lowercase letters indicate significant differences at different spatial heights of the same underlying surface. TR: daily temperature range, RR: daily relative humidity range.

时段(14:00)，土面岩体大量吸收太阳短波辐射，致使自身温度快速升高，岩体又以长波辐射形式对内部空间进行加热，导致内部空间气温上升、相对湿度下降，产生“加热”、“减湿”效应，这与石漠化区裸岩引发加热效应的研究结果相一致^[19]。冬季因太阳辐射总量偏低，岩体对太阳短波辐射吸收不足，自身温度上升缓慢，减弱了对内部空间的长波辐射。此外，岩体对内部空间有遮阴作用，这些因素共同作用形成“降温”、“增湿”效应。

从小气候日变化程度上分析，相较于裸地，夏季土面小气候未出现任何“缓冲”效应，这与张邦琨等^[29]、俞国松等^[22]有关森林生态系统的研究结果不一致，究其原因可能是由于下垫面植被覆盖度差异会通过改变地表能量分配、水热过程进而对小气候形成反馈调节^[4]。森林生态系统的植被冠层拦截了部分太阳辐射，减弱了内部空间热交换能力，同时阻滞了空气流动，导致局部空气升温、降温趋势相对缓和。植被自身蒸腾作用强烈，促进了空气水汽凝聚，同时植被根系提升了土壤持水能力，有效缓和了近地表空气干、湿变化。相反，石漠化区下垫面植被退化严重，对局部小气候的调节功能减弱。夏季土面上层气温日变化表现出“加剧”效应，这表明土面下垫面与大气的边界层发生了强烈的水、热交换过程。另外，土面上层空间因缺少岩体遮挡，同时灰色岩体更容易吸收太阳辐射和散发热量，导致岩体对上层

空间的加热效应显著，引发局部气温剧烈变化^[19,35]。全年之中，土面小气候日变化“缓冲”效应发生于冬季。这可能是由于冬季太阳辐射不足，岩体对内部空间加热效应减弱，导致土面下层空气吸收热量大幅降低，局部升温和降温相对缓慢。此外，冬季降雨、水面蒸发量降低，引发近地表水汽消散。同时，岩体对风流动的阻滞作用导致土面下层空间的相对湿度日变化趋于缓和。

在小尺度上，石漠化区两种下垫面小气候在响应夏、冬季日动态变化过程中，表现出水、热负反馈现象，即高湿伴随低温或低湿伴随高温的发生。该现象产生的原因是受地表层水热过程影响，伴随水汽增多，更多热量以潜热形式输出，感热减少，最终引发降温效应，反之亦然^[36]。最新研究表明，合理调控陆地下垫面水热过程，对缓冲气候变化、促进土地可持续利用有积极贡献^[37]。在去过 50 年间(1960—2009)，中国西南地区已呈现气温升高、年降雨量不均匀性增加的趋势，导致持续高温干旱或洪涝等极端天气频发。裸地、土面下垫面小气候效应差异改变了局部近地表层水汽、能量收支平衡，可能会进一步加剧石漠化区气候变化^[38-39]。因此，开展石漠化区下垫面水热过程研究非常迫切且必要，这需从多学科交叉、监测技术手段等方面进行提升，为解析区域气候变化机制及预测未来气候变化提供科学依据。

以往石漠化生态治理多选择立地条件较好的区域进行人工造林种草,立地条件较差的岩石集中区往往因整地成本高、土量少、植被恢复困难等原因被放弃。土面、裸地两种下垫面小气候效应分异显著,一定程度上反映了石漠化区局部气候变化的复杂与不可预测性,这将对植物生长、发育、繁殖甚至石漠化生态治理造成深刻影响^[40-41]。有研究指出,石漠化区不同下垫面气候条件下植被恢复速率差异明显^[42]。因此,下垫面小气候条件对于植被恢复成功与否至关重要^[43]。俞国松等^[22]发现随着植物陆续定植,植被对石漠化区小气候具有正向调节作用,可改善光、温、湿等生态条件,促进生态系统稳定。因此,在以近自然理念为基础的石漠化生态治理实践中,可优先考虑改变生态结构,即引入早期具有石生性的速生岩溶植物,尽快提高地表植被覆盖度,有效改善下垫面小气候条件,加速后期植被正向演替,推进区域生态恢复进程^[44-45]。

石漠化区具有地形非均匀化、高资源异质性、生态极其脆弱等特点,岩性、岩体物理参数、植被覆盖度、极端气候事件等因素均可能引发局部小气候反馈调节^[21,30]。因此,建议今后进行石漠化区下垫面小气候效应研究时应当结合考虑下垫面性质的影响,同时加强与植被更新相关的其他环境要素(光合有效辐射、土壤温湿度及生源要素等)的长期定位观测,深入发掘下垫面—微环境要素—植被三者互作关系及其发生机制,综合提升植被生态恢复效能。

5 结论与建议

(1)石漠化区不同类型下垫面近地表小气候日动态差异显著。不同季节、不同时段,裸地和土面两种下垫面近地表温度、湿度存在差异,但没有一致的规律性。夏季太阳辐射最强时,土面近地表各空间高度气温显著高于裸地,但相对湿度显著低于裸地。冬季白天大部分时段,土面近地表各空间高度气温显著低于裸地,但相对湿度显著高于裸地。

(2)通过长周期日动态数据定量对比分析,明确土面可引发夏季干热和冬季湿冷效应。受季节影响,两种下垫面地表不同空间高度温度、湿度日变化程度差异显著。夏季土面上层空间气温日较差显著高于裸地,但冬季土面下层空间温度、湿度日较差显著低于裸地。石漠化基岩裸露区正处于夏季趋于剧烈、

冬季趋于缓和的小气候变化背景下。与裸岩引发的加热效应不同,石漠化区土面小气候条件更为严酷、多变。

(3)开展石漠化区生态治理,可优先考虑引入早期速生岩溶植物,加快地表植被覆盖,改善局部小气候条件。未来研究应充分考虑下垫面性质对近地层水热过程的影响,加强微环境要素长期定位观测,以揭示下垫面调控植被恢复机制,为石漠化区制订更有针对性的生态防治措施提供依据。

参考文献

- [1] Xiao Honglin, Weng Qihao. The impact of land use and land cover changes on land surface temperature in a karst area of China[J]. *Journal of Environmental Management*, 2007, 85(1): 245-257.
- [2] Opedal Øystein, Armbruster Wscott, Graae Bentej. Linking small-scale topography with microclimate, plant species diversity and intra-specific trait variation in an alpine landscape[J]. *Plant Ecology & Diversity*, 2015, 8(3): 305-315.
- [3] 鲍艳, 吕世华. 干旱、半干旱区陆—气相互作用的研究进展[J]. *中国沙漠*, 2006, 26(3): 454-460.
BAO Yan, LYU Shihua. Review of land-atmosphere interaction research in arid and semi-arid regions[J]. *Journal of Desert Research*, 2006, 26(3): 454-460.
- [4] 李宏宇, 符淙斌, 郭维栋, 马芳. 干旱区不同下垫面能量分配机理及对微气候反馈的研究[J]. *物理学报*, 2015, 64(5): 438-451.
LI Hongyu, FU Congbin, GUO Weidong, MA Fang. Study of energy partitioning and its feedback on the microclimate over different surfaces in an arid zone[J]. *Acta Physica Sinica*, 2015, 64(5): 438-451.
- [5] Frenne Pieterde, Rodríguez-Sánchez Francisco, Coomes David Anthony, etc. Microclimate moderates plant responses to macroclimate warming[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2013, 110(46): 18561-18565.
- [6] Zellweger Florian, Frenne Pieter De, Lenoir Jonathan, etc. Forest microclimate dynamics drive plant responses to warming[J]. *Science*, 2020, 368: 772-775.
- [7] 王兰宁, 郑庆林, 宋青丽. 青藏高原中西部下垫面对东亚大气环流季节转换影响的数值模拟[J]. *高原气象*, 2003, 22(2): 179-184.
WANG Lanning, ZHENG Qinglin, SONG Qingli. Numerical simulation of the influences of west-central Qinghai-Xizang Plateau on East Asia seasonal transition[J]. *Plateau Meteorology*, 2003, 22(2): 179-184.
- [8] 李娟, 李跃清, 蒋兴文, 高鸣鸣. 青藏高原东南部复杂地形区不同天气状况下陆气能量交换特征分析[J]. *大气科学*, 2016, 40(4): 777-791.

- LI Juan, LI Yueqing, JIANG Xingwen, GAO Duming. Characteristics of land-atmosphere energy exchanges over complex terrain area of southeastern Tibetan Plateau under different synoptic conditions[J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2016, 40(4): 777-791.
- [9] 刘方, 王世杰, 罗海波, 刘元生. 喀斯特森林生态系统的小生境及其土壤异质性[J]. *土壤学报*, 2008, 45(6): 1055-1062.
- LIU Fang, WANG Shijie, LUO Haibo, LIU Yuansheng. Microhabitats in karst forest ecosystem and variability of soils[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2008, 45(6): 1055-1062.
- [10] 沈有信, 赵志猛, 毕胜春, 赵高卷, 刘娟. 陆地系统中的露石及其生态作用[J]. *地球科学进展*, 2018, 33(4): 343-349.
- SHEN Youxin, ZHAO Zhimeng, BI Shengchun, ZHAO Gaojuan, LIU Juan. Rock outcrop and its ecological function in terrestrial ecosystem[J]. *Advances in Earth Science*, 2018, 33(4): 343-349.
- [11] 徐红枫, 王妍, 苏倩, 黎舟, 贾玉洁. 基于 Google Earth Engine 的云南省典型岩溶地区 30 年石漠化演变与驱动因子分析[J]. *干旱区资源与环境*, 2022, 36(5): 94-101.
- XU Hongfeng, WANG Yan, SU Qian, LI Zhou, JIA Yujie. Evolution of rock desertification and driving factors in typical karst areas of Yunnan Province in the past 30 years based on Google Earth Engine[J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2022, 36(5): 94-101.
- [12] 李成芳, 王忠诚, 李振炜, 徐宪立. 西南喀斯特区土壤侵蚀研究进展[J]. *中国岩溶*, 2022, 41(6): 962-974.
- LI Chengfang, WANG Zhongcheng, LI Zhenwei, XU Xianli. Research progress of soil erosion in karst areas of Southwest China[J]. *Carsologica Sinica*, 2022, 41(6): 962-974.
- [13] 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: 以贵州花江峡谷区小流域为例[J]. *生态学杂志*, 2006, 25, 25(9): 1038-1043.
- RONG Li, WANG Shijie, DU Xuelian. Microclimatic effects along environmental gradient in karst rocky desertified area: A case study of a small catchment in Huajiang gorge of Guizhou Province[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2006, 25(9): 1038-1043.
- [14] 颜萍, 刘子琦, 肖杰, 胡晚枚, 陈航. 喀斯特石漠化治理区不同土地利用方式的小气候效应[J]. *中国岩溶*, 2016, 35(5): 557-565.
- YAN Ping, LIU Ziqi, XIAO Jie, HU Wanmei, CHEN Hang. Microclimate effects of different land use types in demonstration areas for combating karst rocky desertification[J]. *Carsologica Sinica*, 2016, 35(5): 557-565.
- [15] Liu Chunni, Huang Yang, Wu Feng, Liu Wenjing, Ning Yiqiu, Huang Zhenrong, Tang Shaoqing, Liang Yu. Plant adaptability in karst regions[J]. *Journal of Plant Research*, 2021, 134: 889-906.
- [16] 罗美, 周运超, 唐风华. 不同植被下碳酸盐岩石发育形成土壤属性研究[J]. *中国岩溶*, 2023, 42(2): 277-289.
- LUO Mei, ZHOU Yunchao, TANG Fenghua. Soil properties of carbonate rocks under different vegetation types[J]. *Carsologica Sinica*, 2023, 42(2): 277-289.
- [17] Cai Lulu, Xiong Kangning, Liu Ziqi, Li Yuan, Fan Bo. Seasonal variations of plant water use in the karst desertification control[J]. *Science of the Total Environment*, 2023, 885: 163778.
- [18] Bátori Zoltán, Vojtkó András, Farkas Tünde, Szabó Anna, Havadtői Kkrisztina, Vojtkó Annae, Tölgyesi Csaba, Cseh Viktória, Erdős László, Maák Istvánelek, Keppel Gunnar. Large- and small-scale environmental factors drive distributions of cool-adapted plants in karstic microrefugia[J]. *Annals of Botany*, 2017, 119(2): 301-309.
- [19] 李生, 薛亮, 王佳, 任华东, 姚小华. 石漠化地区裸岩表面温度和空气温湿度动态变化[J]. *生态学杂志*, 2019, 38(2): 436-442.
- LI Sheng, XUE Liang, WANG Jia, REN Huadong, YAO Xiaohua. The dynamics of bare rock surface air temperature and relative humidity in karst rocky desertification area[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2019, 38(2): 436-442.
- [20] Li Sheng, Birk Steffen, Xue Liang, Ren Huadong, Chang Jun, Yao Xiaohua. Seasonal changes in the soil moisture distribution around bare rock outcrops within a karst rocky desertification area (Fuyuan county, Yunnan Province, China)[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2016, 75(23): 1-10.
- [21] Shen Youxin, Wang Dianjie, Chen Qiaoqiao, Tang Yingyin, Chen Fajun. Large heterogeneity of water and nutrient supply derived from runoff of nearby rock outcrops in karst ecosystems in SW China[J]. *Catena*, 2019, 172: 125-131.
- [22] 俞国松, 王世杰, 容丽. 茂兰喀斯特森林演替阶段不同小生境的小气候特征[J]. *地球与环境*, 2011, 39(4): 469-477.
- YU Guosong, WANG Shijie, RONG Li. Microclimate characteristics of different microhabitats in successional stages of Maolan karst forest[J]. *Earth and Environment*, 2011, 39(4): 469-477.
- [23] 李安定, 卢永飞, 韦小丽, 喻理飞. 花江喀斯特峡谷地区不同小生境土壤水分的动态研究[J]. *中国岩溶*, 2008, 27(1): 56-62.
- LI Anding, LU Yongfei, WEI Xiaoli, YU Lifei. Studies on the regime of soil moisture under different microhabitats in Huajiang karst valley[J]. *Carsologica Sinica*, 2008, 27(1): 56-62.
- [24] 俞筱押, 李玉辉. 滇石林喀斯特植物群落不同演替阶段的溶痕生境中木本植物的更新特征[J]. *植物生态学报*, 2010, 34(8): 889-897.
- YU Xiaoya, LI Yuhui. Characteristics of woody plant regeneration in karren-habitats successional plant communities in Yunnan Shilin karst area of China[J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2010, 34(8): 889-897.
- [25] Zhou Yunchao, Wang Shijie, Lu Hongmei, Xie Liping, Xiao Dean. Forest soil heterogeneity and soil sampling protocols on limestone outcrops: Example from SW China[J]. *Acta Carsologica*, 2010, 39: 115-122.
- [26] 周淑贞, 张如一, 张超. *气象学与气候学*[M]. 北京: 高等教育出版社, 1997.
- [27] 胡隐樵, 孙菽芬, 郑元润, 张强, 傅培健. 稀疏植被下垫面与大气相互作用研究进展[J]. *高原气象*, 2004, 23(3): 281-296.
- HU Yinqiao, SUN Shufen, ZHENG Yuanrun, ZHANG Qiang,

- FU Peijian. Review of study on interaction between underlying surface with sparse vegetation and atmosphere[J]. *Plateau Meteorology*, 2004, 23(3): 281-296.
- [28] 彭大为, 周秋文, 谢雪梅, 韦小茶, 唐欣. 下垫面因素对喀斯特地区水分利用效率的影响[J]. *地理科学进展*, 2021, 40(12): 2086-2100.
- PENG Dawei, ZHOU Qiuwen, XIE Xuemei, WEI Xiaocha, TANG Xin. Effect of underlying surface factors on water use efficiency in the karst area[J]. *Progress in Geography*, 2021, 40(12): 2086-2100.
- [29] 张邦琨, 韦小丽, 曾信波. 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*, 1995, 19(4): 16-19.
- [30] 杜雪莲, 王世杰. 喀斯特石漠化区小生境特征研究: 以贵州清镇王家寨小流域为例[J]. *地球与环境*, 2010, 38(3): 255-261.
- DU Xuelian, WANG Shijie. Micro-habitat characteristics in the karst desertification area: A case study of the Wangjiazhai catchment in Guizhou Province[J]. *Earth and Environment*, 2010, 38(3): 255-261.
- [31] 熊华, 于飞. 喀斯特中度石漠化地区不同生境小气候变化特征[J]. *贵州农业科学*, 2013, 41(8): 103-105, 108.
- XIONG Hua, YU Fei. Characteristics of microclimate change in different habitats of karst moderate rocky desertification area[J]. *Guizhou Agricultural Sciences*, 2013, 41(8): 103-105, 108.
- [32] 陈朝军, 袁道先, 程海, YU Tsailuen, SHEN Chuanchou, EDWARDS R Lawrence, 吴尧, 肖思雅, 张键, 王涛, 黄冉, 刘子琦, 李延勇, 李俊云. 人类活动和气候变化触发了中国西南石漠化的扩张[J]. *中国科学: 地球科学*, 2021, 51(11): 1950-1963.
- CHEN Chaojun, YUAN Daoxian, CHENG Hai, YU Tsailuen, SHEN Chuanchou, EDWARDS R Lawrence, WU Yao, XIAO Siya, ZHANG Jian, WANG Tao, HUANG Ran, LIU Ziqi, LI Yanyong, LI Junyun. Human activity and climate change triggered the expansion of rocky desertification in the karst areas of Southwestern China[J]. *Scientia Sinica (Terrae)*, 2021, 51(11): 1950-1963.
- [33] Xu Lingling, Qian Shuan, Zhao Xiulan, Hao Yan. Spatio-temporal variation of vegetation ecological quality and its response to climate change in rocky desertification areas in Southwest China during 2000–2020[J]. *Journal of Resources and Ecology*, 2022, 13(1): 27-33.
- [34] 张艳林, 程国栋, 李新, 韩旭军, 常晓丽. 山区太阳辐射对水热过程影响的敏感性分析[J]. *冰川冻土*, 2012, 34(3): 650-659.
- ZHANG Yanlin, CHENG Guodong, LI Xin, HAN Xujun, CHANG Xiaoli. A sensitivity analysis of effect of solar radiation on heat and water process in mountainous regions[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2012, 34(3): 650-659.
- [35] 王尚彦, 况顺达, 戴传固, 王明章, 刘家仁. 白云岩和石灰岩山区石漠化速度差异原因分析[J]. *贵州地质*, 2009, 26(1): 49-51.
- WANG Shangyan, KUANG Shunda, DAI Chuangu, WANG Mingzhang, LIU Jiaren. Analyses on the reason of rocky desertification speed difference of dolomite and limestone in mountain area[J]. *Guizhou Geology*, 2009, 26(1): 49-51.
- [36] Wouters Hendrik, Keune Jessica, Petrova Irinay, Heerwaarden Chielcvan, Teuling Adriaanj, Pal Jeremys, Arellano Jordivila-gueraude, Miralles Diegog. Soil drought can mitigate deadly heat stress thanks to a reduction of air humidity[J]. *Science Advances*, 2022, 8: eabe6653.
- [37] Jiang Kang, Pan Zhihua, Pan Feifei, Teuling Adriaanj, Han Guolin, An Pingli, Chen Xiao, Wang Jialin, Song Yu, Cheng Lu, Zhang Ziyuan, Huang Na, Ma Shangqian, Gao Riping, Zhang Zhenzhen, Men Jingyu, Lv Xiaoqin, Dong Zhiqiang. Combined influence of soil moisture and atmospheric humidity on land surface temperature under different climatic background[J]. *iScience*, 2023, 26(6): 106837.
- [38] Qin Nianxiu, Wang Junneng, Yang Guishan, Chen Xi, Liang Haoyuan, Zhang Jianbin. Spatial and temporal variations of extreme precipitation and temperature events for the Southwest China in 1960–2009[J]. *Geoenvironmental Disasters*, 2015, 2: 4.
- [39] IPCC. Climate change 2021: The physical science basis. Contribution of working group I to the sixth assessment report of the intergovernmental panel on climate change[M]. Cambridge University Press, 2023.
- [40] Fanourakis Dimitrios, Bouranis Dimitrisl, Giday Habtamu, Carvalho Dálara. Improving stomatal functioning at elevated growth air humidity: A review[J]. *Journal of Plant Physiology*, 2016, 207: 51-60.
- [41] 朱大运, 熊康宁. 气候因子对我国喀斯特石漠化治理影响研究综述[J]. *江苏农业科学*, 2018, 46(7): 19-23.
- ZHU Dayun, XIONG Kangning. Influence of climatic factors on treatment of stony desertification in China's karst area: A review[J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2018, 46(7): 19-23.
- [42] 曹建华, 袁道先, 杨慧, 黄芬, 朱同彬, 梁建宏, 周孟霞, 罗劭侃, 吴夏. 岩溶生态系统中的植物[J]. *中国岩溶*, 2022, 41(3): 365-377.
- CAO Jianhua, YUAN Daoxian, YANG Hui, HUANG Fen, ZHU Tongbin, LIANG Jianhong, ZHOU Mengxia, LUO Qukan, WU Xia. Karst ecosystem and its plants[J]. *Carsologica Sinica*, 2022, 41(3): 365-377.
- [43] 李建鸿, 蒲俊兵, 张陶, 王赛男, 熊小锋, 霍伟杰. 小降雨事件对土壤水分及植物水势空间差异性的影响[J]. *中国岩溶*, 2019, 38(2): 233-242.
- LI Jianhong, PU Junbing, ZHANG Tao, WANG Sainan, XIONG Xiaofeng, HUO Weijie. Effects of light rainfall events on spatial variation of soil moisture and leaf water potential of apple tree (*Malus pumila* Mill.) in a karst graben basin, Yunnan Province[J]. *Carsologica Sinica*, 2019, 38(2): 233-242.
- [44] 段华超, 郑鑫华, 李世民, 李燕燕, 叶澜, 井卉竹, 罗润文, 唐永, 董琼. 云南石漠化地区植被恢复模式及优化建议[J]. *中国岩溶*, 2024, 43(1): 137-146.
- DUAN Huachao, ZHENG Xinhua, LI Shimin, LI Yanyan, YE Lan, JING Huizhu, LUO Runwen, TANG Yong, DONG Qiong.

- Vegetation restoration model and suggestions on its optimization in rocky desertification areas of Yunnan Province[J]. *Carsologica Sinica*, 2024, 43(1): 137-146.
- [45] 宁静, 杨磊, 曹建华, 李亮. 基于文献计量分析的岩溶区植被恢

复研究现状与热点[J]. *中国岩溶*, 2023, 42(2): 321-336.

NING Jing, YANG Lei, CAO Jianhua, LI Liang. Bibliometric analysis of the current research focus on vegetation restoration in karst areas[J]. *Carsologica Sinica*, 2023, 42(2): 321-336.

Daily dynamics effects of microclimate of two underlying surfaces in rocky desertification areas

WANG Jia^{1,2}, LI Sheng^{1,2}, ZHENG Yanhong¹, PAN Wen¹, SUN Yan¹

(1. Research Institute of Subtropical Forestry, Chinese Academy of Forestry, Hangzhou, Zhejiang 311400, China; 2. Puding Karst Rocky Desertification Ecosystem Research Station, Puding, Guizhou 562100, China)

Abstract As an ecologically vulnerable area with the strongest karst development in the world, the karst area in Southwest China exceeds 540,000 km². Long-term human activities and frequent extreme climate have accelerated soil erosion, causing large areas of bedrock to be exposed on the surface; consequently, a rocky desert landscape with severely degraded vegetation came into being. Under the influence of the hot and humid monsoon climate, carbonate rocks underwent dissolution, which formed various heterogeneous underlying surfaces such as earth flatland and stone surface. The local microclimate differences caused by different underlying surfaces play an important role in regional vegetation restoration and ecosystem reconstruction. Current research on environmental factors in rocky desertification areas mainly focuses on water, soil and other aspects, while there is still a lack of research on microclimate of underlying surfaces.

Taking two typical underlying surfaces (earth flatland and bare land) as the research objects, this study aims to explore the microclimate effects of heterogeneous underlying surfaces in rocky desertification areas. A long-term quantitative comparison in daily dynamics of near-surface temperature and humidity of these two underlying surfaces were conducted through simulation experiments. In rocky desertification areas, earth flatland is composed of polygonal rock masses exposed on the surface and patches of soil distributed inside, while bare land is normal land with no exposed rocks and no vegetation coverage. This study area is located in Puding county, Anshun City, Guizhou Province, where karst is strongly developed. The karst landform accounts for 84.27% of the county area with 60.55% of rocky desertification. The county has humid monsoon climate on the north subtropical plateau, with an annual average temperature of 15.1 °C and an annual rainfall of 1,378.2 mm. The annual total solar radiation fluctuates from 85.71 to 458.81 MJ·m⁻².

Preliminary field surveys found that there were large parameter variations in rock mass shape and size, and orientation of earth flatland. In order to improve the reliability and accuracy of the observation results, this study adopted in-situ limestone and concrete pouring technology to conduct simulation construction based on the average parameters of 30 earth flatlands that have been investigated. There were three replicates for each of the two underlying surfaces. To carry out long-term monitoring of temperature and relative humidity, high-resolution iButton DS1923 temperature and humidity recorders were installed at different heights (2 cm, 40 cm and 80 cm) above the surface of the two underlying surfaces. All data analyses were performed in the R version 4.2.3. The functions of tapply and bartlett.test/var.test were used to test data normality and homogeneity of variances. If the data passed the test, one-way ANOVA would be used to conduct multiple comparisons of air temperature and humidity at different spatial heights. An independent sample t-test was used to compare the air temperature and humidity at the same spatial height on earth

(下转第 853 页)

groundwater level variation and precipitation. That is, the longer a groundwater runoff distance is, the more hysteretic the response of groundwater level to precipitation becomes. The groundwater level variation in the runoff–discharge area lags behind precipitation by 2.66–7.7 days, by 1.25–8.04 days in the discharge area. Because the regional hydrogeological conditions of the two groundwater systems in the study area are different, the responses of the two groundwater systems in the north and south to precipitation are also different. In the southern groundwater system, the time lag of the response of groundwater level variations to precipitation gradually increases from the runoff–discharge area to the discharge area. In the northern groundwater system, due to the effect of the long-distance precipitation recharge from upstream, the groundwater level of runoff–discharge area changes more slowly than that of discharge area with multiple sources of recharge.

Key words wavelet analysis, cross correlation analysis, groundwater level dynamics, karst basin

(编辑 张玲)

(上接第 821 页)

flatland and bare land. If the test failed, multiple sets of data would be applied for non-parametric testing and multiple comparisons through the `kruskal.test` function and `PMCMRplus` package. These two groups of data were applied for the wilcoxon rank sum test by the `wilcox.test` function.

Daily dynamics of microclimate of bare land and earth flatland obviously differed on the spatial and temporal scales. When solar radiation was the strongest in summer, temperature at each spatial height of earth flatland was significantly higher than that of bare land ($P<0.05$), and the relative humidity was significantly lower than that of bare land ($P<0.05$), which led to warming and dehumidifying conditions. However, air temperature in the bottom space of earth flatland was significantly lower than that in bare land ($P<0.05$), and the relative humidity was significantly higher than that of bare land ($P<0.05$) from 10:00 to 16:00 in winter, which resulted in cooling and humidifying effects. The daily variation degree of microclimate in bare land and earth flatland was significantly different in response to different seasons. The daily temperature range of the upper layer of earth flatland was significantly higher than that of bare land ($P<0.05$) in summer, indicating that the earth flatland intensified the daily change of air temperature. However, the daily temperature and humidity range of the lower layer of the earth flatland was significantly lower than that of the bare land ($P<0.05$) in winter, showing that the earth flatland buffered the daily change of the microclimate.

At present, bedrock-exposed areas of rocky desertification are under a more severe and changeable microclimate change background. Therefore, based on the differences in the microclimate effects of heterogeneous underlying surfaces, priority should be given to introduce early fast-growing karst plants to accelerate surface vegetation coverage and improve local microclimate conditions, which would play a positive role in buffering microclimate changes in rocky desertification areas and accelerating vegetation restoration.

Key words rocky desertification, underlying surface, microclimate, temperature and humidity, vegetation restoration

(编辑 黄晨晖)