

半干旱地区工程创面植被恢复的温度效应研究

黄树青¹ 顾卫^{1*} 袁帅^{1,2} 林叶彬¹

(1. 北京师范大学 地表过程与资源生态国家重点实验室, 北京 100875;

2. 国家海洋环境监测中心, 辽宁 大连 116023)

摘要 以内蒙古赤通高速公路一处进行植被恢复的工程创面为研究对象,在植被恢复的不同时期,利用红外成像测温仪,多次进行表面温度的实地观测;在观测基础上分析了植被恢复在路域小气候中的温度效应。结果表明:对于半干旱地区的工程创面,在南坡(阳坡)使用浆砌片石护坡,会产生比裸露的自然岩石还要高的表面温度,从而加剧夏天公路路域范围的高温;而在南坡恢复植被覆盖可以显著地降低边坡表面温度,有利于局地小气候的改善,可使夏、秋、冬季南北坡之间的表面温度差下降5~10℃,改善两坡热量的不均程度。土壤水分条件对这种改善效果有明显的影 响。

关键词 半干旱地区; 工程创面; 植被恢复; 表面温度; 温度效应

中图分类号 P 463.2

文章编号 1007-4333(2011)01-0105-08

文献标志码 A

A study on vegetation restoration and its effect on surface temperature on slopes destroyed by engineering in semi-arid areas

HUANG Shu-qing¹, GU Wei^{1*}, YUAN Shuai^{1,2}, LIN Ye-bin¹

(1. State Key Laboratory of Earth Surface Processes and Resource Ecology, Beijing Normal University, Beijing 100875, China;

2. National Marine Environmental Monitoring Center, Dalian 116023, China)

Abstract Vegetation restoration on surfaces destroyed by engineering at a section of Tongliao-Chifeng Expressway was investigated. Temporal observations of surface temperatures were made using infrared imaging thermometer and the effect of vegetation restoration on surface temperature was analyzed. Results show that for surfaces destroyed by engineering in semi-arid area, stone slope-protection on southern slopes yielded higher surface temperature than that of bare natural rocks. This would exacerbate the high temperature if it were applied in the summer. In contrast, vegetation restoration could significantly reduce the surface temperature on southern slopes, which consequently improved the microclimate. Moreover, the difference in surface temperature between southern and northern slopes was mitigated by a decrease of 5–10℃ in summer, fall and winter. Furthermore, soil moisture also significantly affects surface temperature.

Key words semi-arid regions; surfaces destroyed by engineering; vegetation restoration; surface temperature; temperature effect

工程创面是指人类在生产、生活中所实施的各种工程措施使地球表面产生的破坏了原有自然环境的创伤面,如公路、铁路建设所形成的边坡,矿山开采所形成的矸石山,城市建设所形成的采沙坑或弃土堆等,其中公路边坡是最具代表性的工程创面。它们的出现使得原有的地表自然环境受到彻底的破

坏,并带来诸多生态环境问题,如不及时地对工程创面实施保护措施,迅速恢复边坡植被覆盖,不仅工程构造物自身安全得不到保障,还将对周边地区的生态环境带来不利影响。因此,如何做到基础设施等工程建设与生态环境保护的可持续协调发展,是区域开发成败的关键之一,也是必须要解决的重要的

收稿日期: 2010-11-25

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(30870467); 交通部西部交通建设科技项目(200731822314)

第一作者: 黄树青, 博士研究生, E-mail: qing@ires. cn

通讯作者: 顾卫, 教授, 博士生导师, 主要从事生态恢复方面研究, E-mail: weigu@bnu. edu. cn

理论和技术问题。工程创面的植被恢复与重建,将成为今后我国生态环境建设中不可缺少的重要内容^[1-3]。

近年来,随着国家对生态环境建设投入力度的不断加大,针对公路边坡等工程创面植被恢复的工程绿化技术也在不断发展,植草技术、造林技术与坡面防护技术的结合,使得公路绿化从传统的铺草皮技术,发展到人工建植、机械建植、表层覆盖相结合的现代公路绿化技术^[4-12]。与此相关联的植物物种选择、土壤基质配比、覆盖效果改善、群落结构变化、水土流失防治等植被恢复效果研究,也取得了众多的科研成果^[13]。

然而,在全球环境变化,特别是气候变暖的大背景下,工程创面植被恢复的意义已经不再是单纯的景观绿化+创面防护了。植被对地表反射率的贡献、植被对 CO₂ 吸收的贡献、植被对环境温度缓解的贡献等局地气候和小气候问题,也日益受到科研人员的重视,成为衡量生态环境优劣的重要指标之一。以往有关植被改善小气候的研究主要集中在城市、防护林、湿地、工矿区土地复垦等领域^[14-19],而对工程创面植被恢复小气候效应的研究很少,特别是工程创面植被恢复的热环境效应如何还不得而知。其原因之一在于缺少对空间尺度较小的工程创面温度特征的观测手段。针对这种情况,本研究以内蒙古自治区赤峰—通辽高速公路撒力巴段一处岩石边坡为例,使用热像仪对边坡植被恢复前后的坡面热状况进行观测,旨在探讨我国北方半干旱地区工程创面植被恢复的温度效应。

1 研究区概况与方法

1.1 研究区概况

本研究选取的岩石边坡位于内蒙古自治区赤峰市敖汉旗四道湾镇境内,赤峰—通辽高速公路 K72+890—K73+088 处,地理坐标为北纬 41°27′,东经 119°39′,海拔高度 575 m。

敖汉旗属中温带半干旱大陆季风气候,四季分明,气温日差较大。年平均气温 5~7℃,极端最高气温 41.7℃,极端最低气温 -30.7℃,无霜期为 130~150 d。年降水量 310~460 mm,集中于 06—08 月,雨热同期。年蒸发量 242.2 cm,是降水量的 5.6 倍。太阳辐射强烈,年日照时数 2 750~3 020 h。

该边坡周边的地貌为丘陵,相对高差 50~100 m;自然土壤为黄绵土,含沙量较高;自然植被为禾

草、灌木草原,主要植物种类有本氏针茅(*Stipa bungeana*)、百里香(*Thymus quinpuccostatua*)、达乌里胡枝子(*Lespedeza davurica*)、山杏(*Prunus sibirica*)、榆树(*Ulmus pumila*)等,人工植被主要是杨树(*Populus L.*)防风林。

1.2 坡面特征

边坡为爆破+机械开挖而成,分为南、北两侧。除了坡顶和坡两端尚存有少量的土壤母质之外,原有的自然土壤和自然植被已被破坏殆尽,坡面岩石裸露,岩性为火山岩,风化程度中等,岩块大小不一,凹凸起伏剧烈,有较多缝隙。

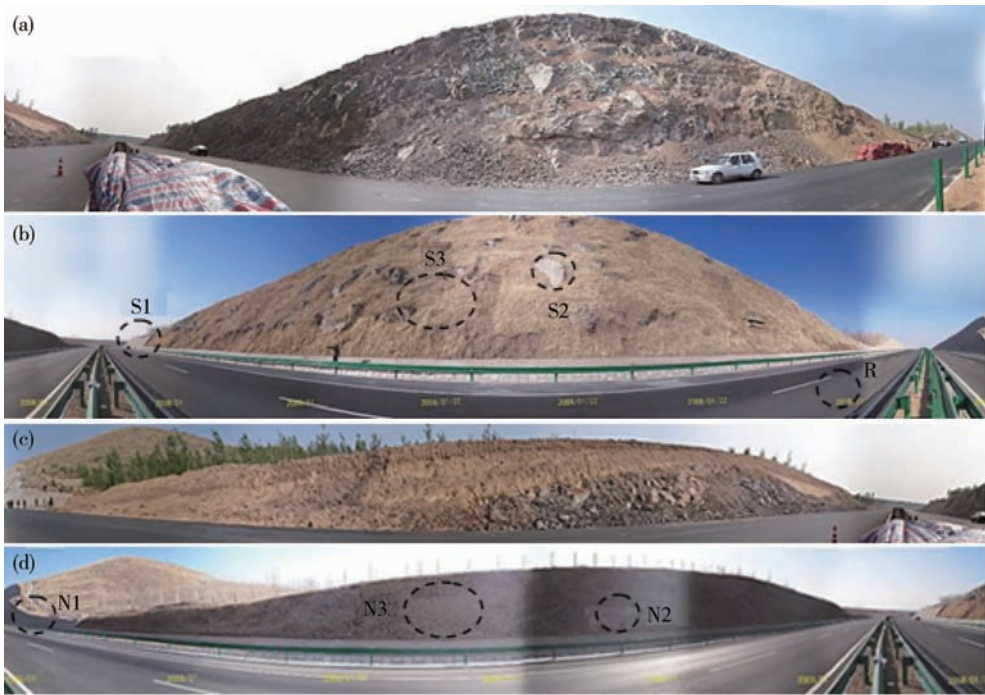
北侧坡面为山顶方向(因其朝南,以下称南坡,图 1(a)),朝向为南偏东 20°(阳坡),平均高度约 18 m,平均坡度 60°,坡面地物主要为岩石和碎石,边坡面积约 4 000 m²。南侧坡面为山脚方向(因其朝北,以下称北坡,图 1(c)),朝向为北偏西 20°(阴坡),平均高度约 5 m,平均坡度 52°,坡面地物为岩石(下半部)和黄土(上半部),边坡面积约 2 000 m²。试验路段两侧的其他边坡,有浆砌片石做成的刚性护坡(S1、N1 处)。2 个坡面之间为铺沥青的高速公路路面。

两处边坡于 2007-06—07 实施了植被恢复工程:采用客土喷播和厚层基质喷播技术,利用压缩空气直接将干的土、肥料、种子等混合制成的基材喷附于坡面上,在边坡表面重新构建了厚度 15~20 cm 的土壤层,播撒了草本植物种子,移植了乔灌木幼苗。实施植被恢复工程后,坡面大部分为植被覆盖,局部仍有大块岩石裸露(图 1(b)和(d))。施工后 2 个月(2007-09),南坡平均植被覆盖率达到 75%,北坡平均植被覆盖率达到 85%。

1.3 仪器及观测方法

在传统的区域气候研究中,气温是表征当地热环境的重要参数。由于空气具有流动性,气温容易受到天气系统或局地环流的影响,因此气温更多地是代表观测点周边较大尺度内的热环境状况。地物表面温度则不同,更多地随大气辐射和地表覆盖物的变化而改变,因此它是对局地热环境最直观、最准确的反映。所以,选择表面温度作为研究工程创面植被恢复温度效应的指标,可以直接显示出不同地表覆盖物之间的热环境差异。

以往对表面温度的测量,主要是将温度计的感应部分接触到被测物体的表面,然后再读取温度计的数值。这种观测方法有 2 个重要缺陷:一是测量



S1、S2、S3、R、N1、N2和N3为重点关注区域，详见表2，图2同。
 (a)南坡，植被恢复前(2007-06-01) (b)南坡，植被恢复后(2008-01-21)
 (c)北坡，植被恢复前(2007-06-01) (d)北坡，植被恢复后(2008-01-21)

图 1 植被恢复前后南北坡表面状况

Fig. 1 Surface condition of slopes before and after vegetation restoration

中温度计感应部分(如水银温度计)难以与被测物体完全紧密接触，辐射、空气对流传热可能会对测量结果有严重影响；二是即便温度计感应部分与被测物体做到了紧密接触，但它反映的也只是接触点的“点”温度，并不能完全代表被测物体所处空间的“面”温度，而“面”温度才是能准确、有效反映局地热环境的指标。由于对表面温度的测量比较困难，不如气温容易获取，这使得该数据经常被忽视^[20]。

红外测温仪器通过测量接收到的来自物体表面的红外辐射的辐亮度便可确定其温度。本研究采用 NEC 三荣株式会社生产的 TH3102MR 型热像仪进行成像测温，该热像仪水平视场角 30°，水平分辨率 255 线，垂直视场角 28.5°，垂直分辨率 207 线，可以直接表示出在镜头视角范围内所有对象物体的表面温度。其工作波段为 8~13 μm，温度测量分辨率 0.08 ℃；测温准确度为测量读数的 ±0.5%。测量时发射率设定为 0.95。

近距离测量时，红外测温仪器的测量误差主要由发射率设定值的误差引起^[21]。参考热像仪说明书，本研究中的植被、土壤、岩石、沥青等主要地物发射率均为 0.93~0.95。根据估计，发射率设定值误

差达 0.02 时，可引起测量值绝对误差约为 1 ℃，但对相同发射率地物的温度差测量影响不大^[20]。

考虑到工程创面植被恢复前后坡面覆盖物性质的差异，以及植被随季节变化而出现的枯荣现象，观测时间分春、夏、秋、冬等不同季节，于 2007-05-31—2008-07-26 分多次进行。每次 1 天或多天连续观测(表 1)，每次观测期间至少包含 1 个太阳不被云遮挡的晴朗中午。除第 1 次仪器位置略有不同外，其他各次都在中央隔离带上同一位置观测。在测量边坡表面温度的同时，记录天气状况和气温。

鉴于观测范围内地物的差异较大，所引起的表面温度差异也十分明显，为了便于比较，在观测范围内(试验边坡、两侧临近边坡、公路路面)选取了代表不同地物的 7 个重点关注区域(图 1)，实际在热图像上选取的是矩形或按地物实际边界选取。每次观测均提取这些重点关注区域的表面温度，并对其进行比较分析。热像仪观测到的表面温度实际上是地表各种覆盖物体表面温度的综合，就植被区域来说，是植被冠层和土壤温度的综合，为了避免赘述，以下均简称为表面温度。各重点关注区域地物及其在植被恢复施工前后的变化情况见表 2。

表1 观测时间及气象条件

Table 1 Period and weather of observations

观测开始日期	观测时间/d	观测次数	观测方式	观测期内气象条件
2007-05-31	3	13	白天连续观测	雨转晴,气温 16.0~31.8 ℃。
2007-08-09	2	16	白天连续观测	晴转多云,气温 17.1~31.4 ℃。
2007-09-06	2	13	全天连续观测	晴,气温 10.5~28.7 ℃。
2007-10-15	1	5	白天观测	晴,气温 3.2~18.0 ℃。
2008-01-21	1	3	中午、下午观测	多云,气温 -11.5~-8.8 ℃。
2008-04-20	2	9	全天观测	雨转多云,气温 9.1~20.9 ℃。
2008-07-24	3	22	全天连续观测	阴转晴,气温 22.8~36.8 ℃。

表2 植被恢复前后重点关注区域的地物性质

Table 2 Land object on interesting areas before and after vegetation restoration

坡面状况	南坡			路面 R	北坡		
	S1	S2	S3		N1	N2	N3
植被恢复前	浆砌片石	岩石	碎石	沥青路面	浆砌片石	岩石	裸土
植被恢复后	浆砌片石	岩石	植被	沥青路面	浆砌片石	岩石	植被

2 结果与分析

2.1 植被恢复前后正午不同地物表面温度的差异

根据太阳辐射的日变化规律,晴朗的中午是地球表面温度最高的时段,也是不同地物之间表面温度差异最显著的时段。为了反映出植被恢复前后边

坡表面温度差异的一般性特征,特选择植被恢复前(2007-06-01)和植被恢复后(2007-09-07)12:00的坡面热图像,对不同坡面物质的表面温度差异进行对比分析。

南坡(阳坡)植被恢复前后的表面温度的变化情况见图2(a)和(b)。S1(浆砌片石)和S2(岩石)2处

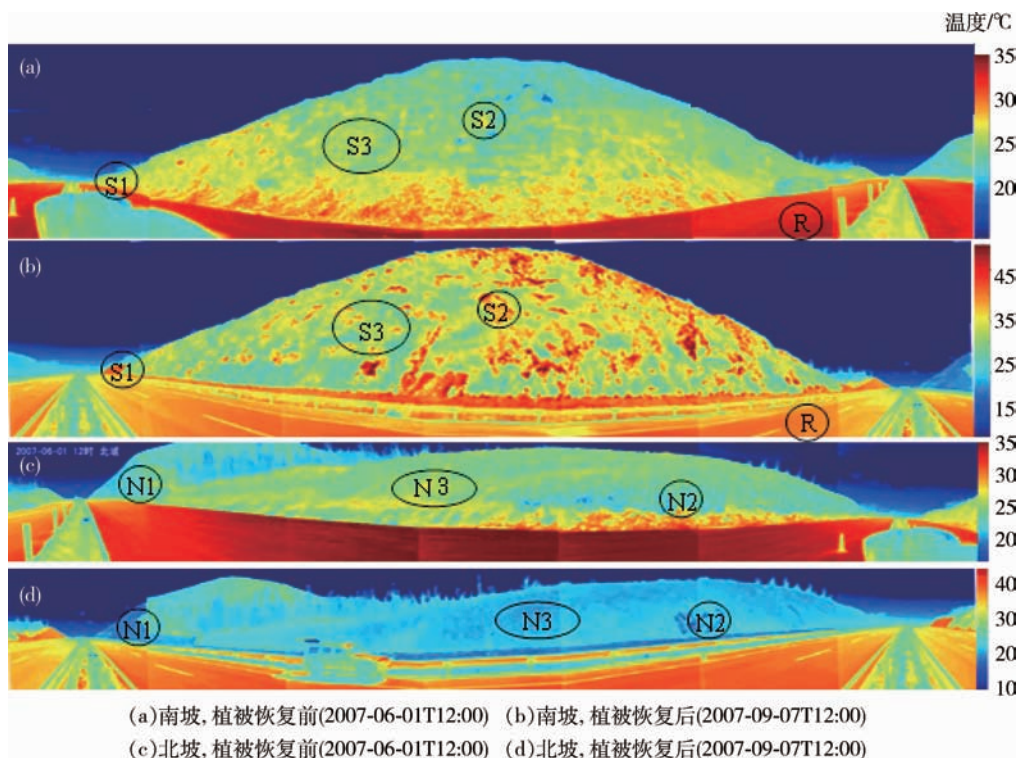


图2 植被恢复前后南北坡表面温度

Fig. 2 Thermal images of slopes before and after vegetation restoration

的坡面组成物质在植被恢复前后并未发生变化。植被恢复前, S1 和 S2 处的表面温度与整个边坡的表面温度相差不大, 边坡下部的表面温度高于上部(图 2(a)); 植被恢复后, 边坡表面温度显著降低, S1 和 S2 的表面温度高出大部分坡面的表面温度近 10 °C (图 2(b)和表 3), 表明南坡(阳坡)植被具有良好的

降温效果。与图 1 对比可以看出, 植被越好的地方降温效果越好。

北坡(阴坡)无论是植被恢复前还是植被恢复后, 正午 N1(浆砌片石)、N2(岩石)的表面温度, 都略低于坡面其他部位的表面温度(图 2(d)、表 3)。表明北坡(阴坡)植被对表面温度没有明显影响。

表 3 植被恢复前后重点关注区域的表面温度

Table 3 Surface temperature of interesting areas before and after vegetation restoration °C

坡面状况	观测时间	南坡			路面 R	北坡		
		S1	S2	S3		N1	N2	N3
植被恢复前	2007-06-01T12:00	26.3	26.4	27.0	34.6	22.2		24.3
植被恢复后	2007-09-07T12:00	40.9	37.2	31.9	41.9	20.4	21.1	22.9

2.2 植被恢复前后南坡不同地物表面温度差异的日变化

沥青路面(R)因其材质和颜色的关系, 无论是植被恢复前、后, 其表面温度均高于其他地物(图 3)。S2 是高出坡面 0.5 m 左右的大块岩石, 由于与空气的接触面较大, 夜间能迅速冷却, 因此无论是植被恢复前还是恢复后, 都为边坡表面温度日最低值所在区域(图 3)。植被恢复前, S1(浆砌片石)和 S3(碎石)性质相近, 因此两者表面温度的日变化基本

上是同步的, 午后, S2 与 S1 和 S3 的表面温度也基本上重合(图 3(a)。植被恢复后, S3 由碎石变成生长在人工客土层上的植被, 12:00 的表面温度明显低于 S1 和 S2, 两者温度差达 10 °C 以上(图 3(b))。

由于植被恢复前后表面温度的观测时间在季节和天气条件等方面存在差异, 为便于比较, 选取 S1(浆砌片石)的表面温度为基准温度, 通过分析其他地物的表面温度与基准温度的差值, 进一步明确在同一坡向的坡面上, 不同地物之间表面温度的差异。

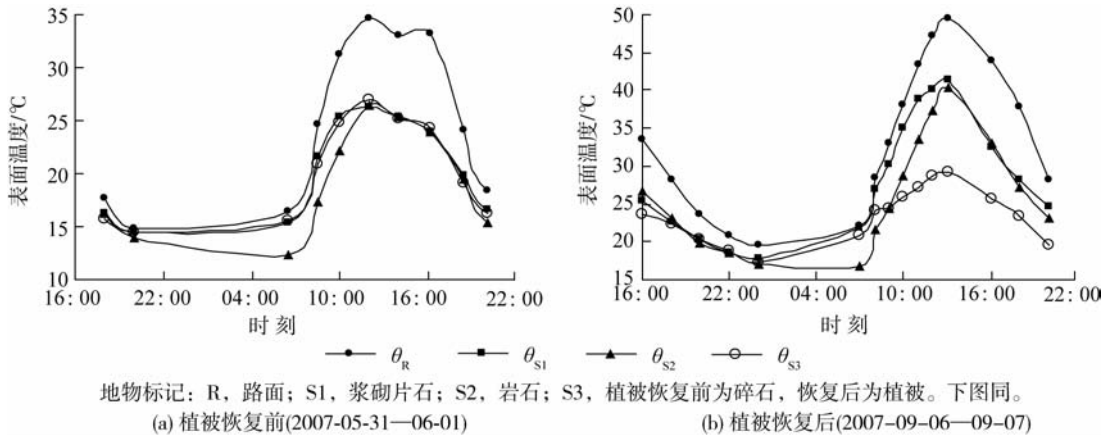


图 3 南坡植被恢复前后不同地物表面温度的日变化

Fig. 3 Diurnal variation of observed objects surface temperature before and after vegetation restoration

图 4 示出南坡在植被恢复前后不同地物表面温度与 θ_{S1} 差值的日变化。可见: R 与 S1 的温度差 ($\theta_R - \theta_{S1}$) 随着太阳辐射的增强而增大, 到 14:00—16:00 间达到最大; ($\theta_{S2} - \theta_{S1}$) 在中午前一直低于 0 °C, 之后保持在 0 °C 上下(图 4(a)); 因为地物类型

的改变, 植被恢复前 ($\theta_{S3} - \theta_{S1}$) 在 0 °C 上下波动, 而植被恢复后大幅下降, 中午前后 θ_{S3} 低于 θ_{S1} 12 °C 以上(图 4(b)), 而从夜间到清晨, ($\theta_{S3} - \theta_{S1}$) 接近于 0 °C。北坡不同地物的表面温度日变化与南坡类似, 但不明显, 在此不做分析。

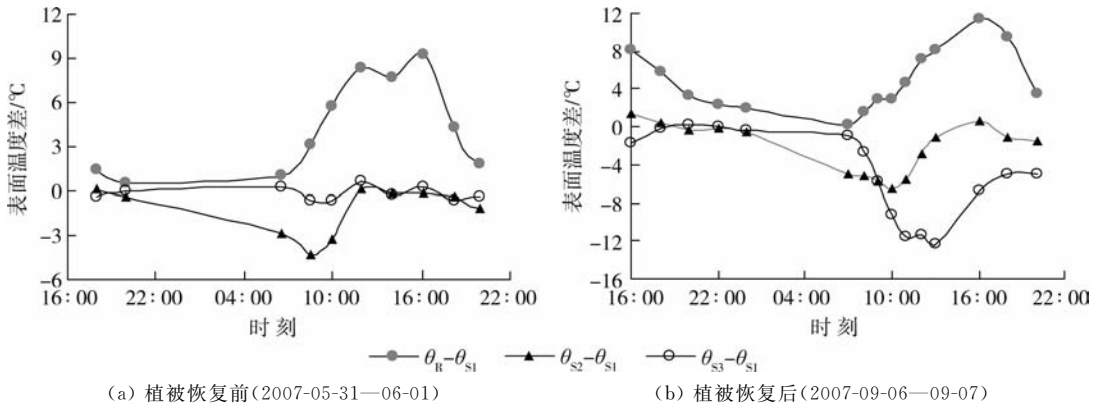


图4 以浆砌片石(S1)表面温度为基准南坡植被恢复前后不同地物表面温度差值的日变化
 Fig. 4 Diurnal variation of surface temperature difference between S1 and other observed objects on south slope before and after vegetation restoration

2.3 植被恢复后坡面不同地物表面温度差异的年内变化

2.3.1 季节变化

选取各次观测中晴朗正午(12:00左右)的表面温度数据,分别计算植被覆盖区域(S3、N3,表2)的表面温度与浆砌片石(S1、N1)表面温度的差值,用以反映植被恢复所产生的温度效应的季节差异。

对同一坡向,北坡各个季节12:00, $(\theta_{N3} - \theta_{N1})$ 均大于 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$, 温度差为 $1\sim 5\text{ }^{\circ}\text{C}$, 表明北坡的植被表面温度均高于浆砌片石表面温度,两者之间的温度差随季节改变呈比较平缓的波动,秋季温度差较大,春、夏季温差较小(图5)。南坡的情况则与之相反,植被恢复后,各季节12:00的 $(\theta_{S3} - \theta_{S1})$ 均小于 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$, 温差 $-2\sim -11\text{ }^{\circ}\text{C}$, 表明南坡植被覆盖区域的表面温度均低于浆砌片石表面温度,植被的降温作用

明显。 $(\theta_{S3} - \theta_{S1})$ 随季节改变呈较剧烈的起伏变化,夏季最大,春季较小,这与植物生长状况有密切关系,春季植被尚未返青,因此降温效果相对较弱。

对不同坡向,各个季节12:00南坡同类地物的表面温度均高于北坡,不同坡向、同类地物之间的表面温度差在秋季最大、春季最小(图6)。如果把 $(\theta_{S1} - \theta_{N1})$ (S1、N1均为浆砌片石,植被恢复前后没有变化)作为植被恢复前南北坡之间的表面温度差,把 $(\theta_{S3} - \theta_{N3})$ (S3、N3在植被恢复前分别为碎石和裸土,植被恢复后为植被)作为植被恢复后南北坡之间的表面温度差,那么在植被恢复后,夏、秋、冬季南北坡之间的表面温度差下降了 $5\sim 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

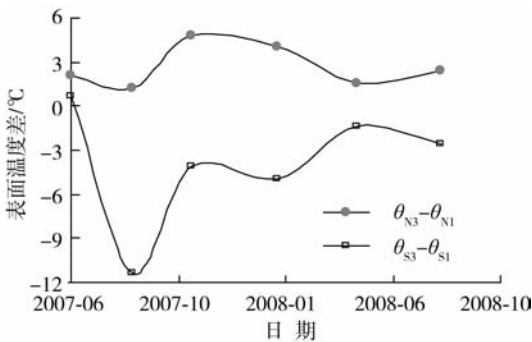


图5 同一坡向不同地物12:00表面温度差的季节变化
 Fig. 5 Seasonal change of surface temperature difference of objects on same slope

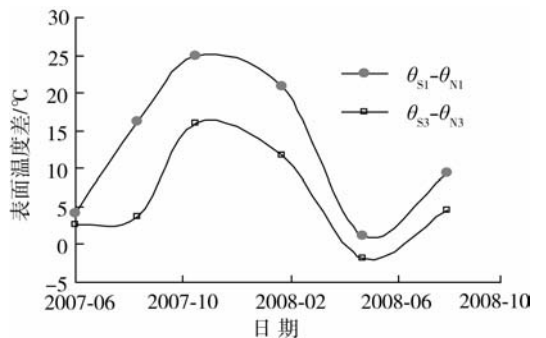


图6 不同坡向相同地物12:00表面温度差的季节变化
 Fig. 6 Seasonal change of surface temperature difference of similar object on different slope

从图6中还可以看出,植被恢复所带来的降低南北坡之间表面温度差的效果,在2007年8月达 $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以上,而2008年8月仅为 $5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右。这是由于当地2008年夏季的雨水比前一年少很多,干旱使

N1,浆砌片石;N3,植被恢复前为裸土,恢复后为植被覆盖,下图同。

得植被生长受到影响。特别是南坡植被受到的影响更显著，枯死率较高，绿色植被覆盖度降低（不足 50%），从而使得南坡的表面温度升高所致。

2.3.2 不同地物表面温度相关性

对植被恢复后所有 53 次观测（不限于正午）结果进行分析发现，同一坡向的边坡内，不同地物表面温度间存在较强的线性相关，这种相关性北坡表现明显。

回归分析的结果表明(图 7(a))：北坡的浆砌片石(N1)与岩石(N2)表面温度间的相关系数接近于 1，北坡的浆砌片石(N1)与植被(N3)表面温度之间的相关系数也较高，为 0.98，三者在 0~40 °C 时表面温度十分接近。这是因为北坡背阴，各种地物都难以接受太阳的直接辐射，不同地物之间的差异性被掩盖。

而南坡不同地物表面温度间的相关性比北坡略差(图 7(b))。浆砌片石(S1)的表面温度 10~25 °C 时与岩石(S2)相差不大，25~40 °C 时平均高于岩石(S2)2 °C 左右。南坡浆砌片石(S1)与植被(S3)间的表面温度相差较大，在 10~25 °C 时浆砌片石(S1)平均高于植被(S3)0.2~1.0 °C，在 25~40 °C 时平均高于植被(S3)2.2~5.3 °C，最大温差达 11.6~12.7 °C。这是因为南坡各地物都接受太阳的直接辐射，其太阳辐射吸收率等热性质的差异对表面温度的影响十分显著。

对表面温度相关性的研究结果还表明，在南坡使用浆砌片石护坡会产生比裸露的自然岩石还要高的表面温度，进一步加剧夏天公路路域范围内的高温；而进行植被恢复，则能显著降低坡面温度，温度越高降温效果越显著。

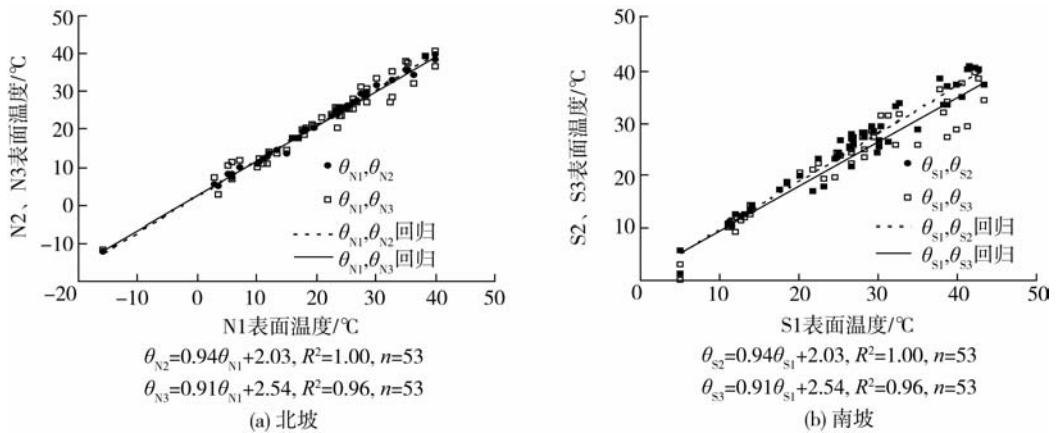


图 7 同坡面不同地物表面温度的线性关系

Fig. 7 Linear relationship among observed objects on same slope

2.4 水分条件对植被表面温度的影响

植被覆盖区域表面温度的高低与土壤水分含量有关。当降雨或人工浇水时，蒸散加剧，表面温度有所降低。图 8 示出 2008-07-26T14:00 南坡的表面温度：从左到右表面温度逐渐升高，相差 5 °C 以上。

同一时间、同样植被覆盖的条件下，同一坡面上温度差异很大。其原因在于土壤水分条件的差异：当时为了抗旱，对坡面植被实施了人工浇水养护，左侧为观测前一天浇水，中间为观测当天上午浇水，而右侧当时尚未浇水，土壤水分条件好的位置温度较低。

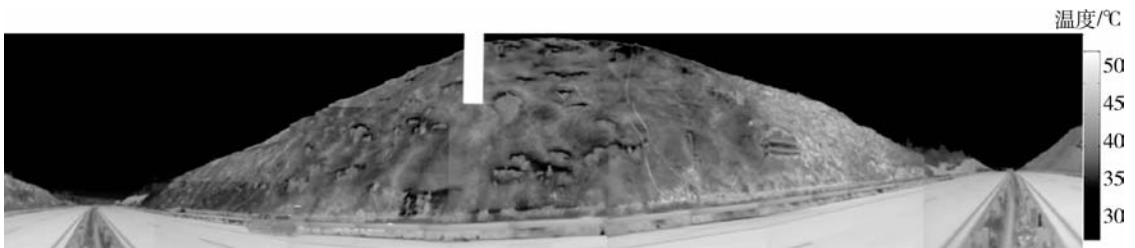


图 8 植被恢复后 2008-07-26T14:00 南坡热图像

Fig. 8 Thermal image of south slope at 14 p.m. Aug. 26, 2008

3 结论与讨论

研究表明,在半干旱地区:1)南坡(阳坡)采用浆砌片石护坡,会产生比裸露的自然岩石还要高的表面温度,使得路域小气候恶化;进行植被恢复可以显著降低边坡表面温度,有利于改善局地小气候,植被越密集降温效果越好。对于北坡(阴坡),植被恢复对改变边坡表面温度没有明显影响。2)植被护坡的降温效果中午前后表现突出,夜间和清晨影响较小。3)恢复边坡植被覆盖可使夏、秋、冬季南北坡之间的表面温度差下降 $5\sim 10\text{ }^{\circ}\text{C}$,从而减少阴阳两坡的热量不均程度。这种改善效果夏季最大,春季较小。季节差异与植被生长状态、气温和土壤水分条件相关。

空气温度的变化主要取决于地面长波辐射。地表覆盖物性质的改变,必然会引起地表长波辐射的变化,并影响局地气温的变化,而空气的流动性又会使局地气温向更大的范围扩散,从而影响人类的生活和生产活动。由于缺少边坡植被恢复之前的坡面气温数据,本研究无法分析边坡覆盖物变化对空气温度的影响,有待做进一步的研究。此外,土壤水分条件的差异可导致温度效应的较大差异,本研究仅是对半干旱地区坡面植被恢复温度效应的探讨,对于其他地区的效果,有待进一步观测研究。

参 考 文 献

- [1] 赵晓英,孙成权. 恢复生态学及其发展[J]. 地球科学进展, 1998,13(5):474-480
- [2] 周跃. 土壤植被系统及其坡面生态工程意义[J]. 山地学报, 1999,17(3):224-229
- [3] 朱德华,蒋德明,朱丽辉. 恢复生态学及其发展历程[J]. 辽宁林业科技, 2005(5):48-50
- [4] 周跃. 坡面生态工程及其发展现状[J]. 生态学杂志, 1999,18(5):68-73

- [5] 周跃. 欧美坡面生态工程原理及应用的发展现状[J]. 土壤侵蚀与水土保持学报, 1999,5(1):79-85
- [6] 李绍才,孙海龙. 中国岩石边坡植物护坡技术现状及发展趋势[J]. 资源科学, 2004,26(增刊):61-66
- [7] 张伟雄,曹志强,黄小清. 高速公路边坡生态防护技术探讨[J]. 公路, 2003(8):123-126
- [8] 王思成,兰剑,王宁. 高速公路边坡生物防护技术研究进展[J]. 宁夏农学院学报, 2003,24(2):76-81
- [9] 顾卫,江源,张春禹,等. 厚层基质喷附技术在半干旱地区高速公路生态恢复与重建中的应用研究[J]. 公路交通科技:应用技术版, 2006(9):157-160
- [10] 顾卫,江源,余海龙,等. 我国北方地区边坡客土喷播技术的应用现状与问题[J]. 公路交通科技(应用技术版), 2007(7):36-39
- [11] 王慧芳,罗承德. 高等级公路边坡绿化植物材料选择初探[J]. 四川草原, 2004(3):53-55
- [12] 陶岩,江源,顾卫,等. 内蒙古中部高速公路边坡植被恢复研究与实践[J]. 中国水土保持科学, 2006,4(增刊):61-66
- [13] 田国行,杨春,杨晓明,等. 路基边坡草灌植被消减降雨侵蚀定量分析[J]. 中国农业大学学报, 2010,15(2):24-29
- [14] 宝日娜,杨泽龙,刘启,等. 达里诺尔湿地的小气候特征[J]. 中国农业气象, 2006,27(3):171-174
- [15] 李金花,王辉. 风沙沿线新灌区农田防护林体系小气候效益观测分析[J]. 甘肃农业大学学报, 1999,34(1):65-70
- [16] 谢平,李燕. 海岸沙地防护林的小气候效应[J]. 中国沙漠, 2001,21(1):93-96
- [17] 王健,桑长青,何清. 塔克拉玛干沙漠公路中段两侧不同下垫面的小气候分析[J]. 中国沙漠, 2003,23(5):577-580
- [18] Santamouris M, Papanikolaou N, Koronakis I, et al. Thermal and air flow characteristics in a deep pedestrian canyon under hot weather conditions[J]. Atmospheric Environment, 1999, 33:4503-4521
- [19] 刘龙. 公路边缘效应与植被的特点[J]. 公路, 2008(8):244-247
- [20] 李宁,黄树青,顾卫. 红外热像仪在公路小气候监测中的应用[J]. 公路交通科技, 2006,23(9):154-158
- [21] 杨立. 红外热像仪测温计算与误差分析[J]. 红外技术, 1999,21(4):20-24

(责任编辑:刘迎春)