

文章编号:1671-8879(2015)04-0041-07

# 不同地面类型热物理性质差异分析

张中琼<sup>1,2</sup>, 吴青柏<sup>1,2</sup>, 荀学义<sup>3</sup>, 侯彦东<sup>1</sup>, 高思如<sup>1</sup>

(1. 中国科学院 冻土工程国家重点实验室, 甘肃 兰州 730000; 2. 中国科学院 青藏高原北麓河冻土工程与环境综合观测研究站, 青海 格尔木 816000; 3. 内蒙古自治区气象局, 内蒙古 呼和浩特 010051)

**摘 要:**热物理性质的差异是不同地面类型能量交换差异的物质基础。通过对青藏高原北麓河地区工程地面(沥青路面、砂砾路面)和自然地面(天然地表、高寒草原、高寒草甸)气象参数的观测与计算,分析地表温度、反照率、粗糙度和总体输送系数之间的差异。研究表明:夏秋季节沥青路面昼夜温度均高于其他地面类型,春冬季节沥青路面夜间温度高于其他地面类型;砂砾路面、高寒草原、高寒草甸白天表面温度差异约为 2℃~5℃,夜间差异为 1℃~3℃;天然地表的反照率大于沥青路面,反照率受太阳高度角和降水影响,随太阳高度角增加呈指数递减,在降雨时地面反照率有增有减,降雪增加地面反照率,降水后介质湿度增加,反照率减小;5 种地面类型的粗糙度从大到小依次为砂砾路面、天然地表、沥青路面、高寒草甸、高寒草原;粗糙度的大小间接反映地面的能量输送能力,冬季天然地表输送系数大于其他地面类型,在其他季节,天然地表和沥青路面的动量输送系数较大,其次为高寒草原、高寒草甸、砂砾路面。

**关键词:**道路工程;地面类型;温度;反照率;能量输送

**中图分类号:**U411 **文献标志码:**A

## Analysis on thermal physical properties of different ground types

ZHANG Zhong-qiong<sup>1,2</sup>, WU Qing-bai<sup>1,2</sup>, XUN Xue-yi<sup>3</sup>, HOU Yan-dong<sup>1</sup>, GAO Si-ru<sup>1</sup>

(1. State Key Laboratory of Frozen Soil Engineering, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, Gansu, China; 2. Beiluhe Observation Station of Frozen Soil Environment and Engineering, Chinese Academy of Sciences, Geermu 816000, Qinghai, China; 3. Inner Mongolia Autonomous Region Meteorological Observatory, Hohhot 010051, Inner Mongolia, China)

**Abstract:** The differences of thermal-physical properties is the material basis of energy exchange differences for different ground types. The physical properties of the parameters was observed and calculated through the observation and calculation of the physical properties of engineering pavement (asphalt and sand pavement) and natural ground surface (natural surface, steppe and meadow) in Beiluhe permafrost area on the Qinghai-Tibet Plateau, the differences between surface temperature, albedo, roughness and transfer coefficients were analyzed. The results show that in summer and autumn day and night temperatures of asphalt pavement are higher than that of other ground types and in spring and winter the temperatures at night are higher than of the other ground types. Difference of surface temperatures of sand pavement, alpine steppe and alpine meadow is about 2℃ to 5℃ in daytime, and 1℃ to 3℃ at night. The albedo of the

收稿日期:2015-03-17

基金项目:国家自然科学基金青年基金项目(41301071);国家自然科学基金重点项目(41330634);中国科学院寒区旱区环境与工程研究所青年人才基金项目(51Y351031);冻土工程国家重点试验室自主资助项目(SKLFSE-ZQ-19)

作者简介:张中琼(1984-),女,甘肃白银人,助理研究员,工学博士,E-mail:zhongqionghao@163.com。

natural surface is greater than that of the asphalt pavement. Albedo was affected by solar elevation angle, rain, or snow conditions. According to the roughness, the sequence decreasingly of the five ground types are sand pavement, natural surface, asphalt pavement, alpine meadow, and alpine steppe. The roughness reflects the energy transmission capacity of ground indirectly. In winter, transfer coefficients of natural surface are larger than the other ground types. In other seasons, the momentum transfer coefficients of the natural surface and asphalt pavement are larger, followed by grassland, meadow, gravel. 2 tabs, 5 figs, 16 refs.

**Key words:** road engineering; ground type; temperature; albedo; energy transport

## 0 引言

冻土是地层通过地面与大气间水热交换的产物,冻土活动层的季节冻结和季节融化过程依赖于太阳辐射、地形、地貌、地中热流以及地形和地面性质。地面性质影响辐射、对流、传导等热交换过程。地面热性质的热吸收差异,引起下伏冻土的差异变化<sup>[1]</sup>。现有对陆面上热物理性质的观测研究包括高原河谷、高寒草甸、草原、半干旱过渡带、沙漠、戈壁、裸地以及湿润的草地、农田和湖滨等自然下垫面类型<sup>[2-4]</sup>,并获得了一系列研究成果。通过草地和裸地地气能量交换的观测,发现在其他条件相同的情况下,大气稳定度越高(低),植被温度越高(低);地面粗糙度越小(大),植被温度越高(低)<sup>[5]</sup>。通过季风期青藏高原高寒草甸、高原湖泊、荒漠化草原对比研究,发现随着植被参数逐渐变大,地表反射率和地表温度均减小<sup>[6]</sup>;地表粗糙度与植被的覆盖度和高度以及下垫面的性质有关;下垫面状况还影响动量总体输送系数对稳定度的依赖程度<sup>[7]</sup>;降雨对反照率有明显影响<sup>[8]</sup>。但对工程路面物理性质研究较少,仅对反射率和辐射做了相关研究。库德里雅采夫研究了砂石、黑化、新(旧)白色涂料、沥青表面和砾石垫层表面的反射率,分别为 18%、6%、75%、10%~30%、13%<sup>[9]</sup>;朱东鹏等对青藏高原楚玛尔河的宽幅沥青路面和天然地表进行对比观测发现,沥青路面下部土体的最高温度比天然地面下部高 10℃左右,但是最低温度低于同一深度天然地面下部土体<sup>[10]</sup>;黄以职等研究表明,与天然地表相比,沥青路面增加了向下长波和短波的吸收,减少了向上短波辐射能力,增加了沥青路面的吸热量,沥青路面夏季的湍流散热量大于天然地表,潜热散热量小于天然地面<sup>[11-12]</sup>。深入分析地面的热物理性质对进一步分析地面吸热,热力状况以及下伏多年冻土的变化有重要意义。

为此,在已有研究的基础上,本文以青藏高原北

麓河盆地沥青路面、砂砾路面、天然地表、高寒草原、高寒草甸的气象观测数据为基础,对比分析不同地面类型的表面温度、地表反照率、粗糙度、总体输送系数等物理性质参数的变化情况,讨论地面能量反射、能量散失、能量吸收方面的差异及其影响因素,为进一步分析沥青路面的吸热情况提供依据。

## 1 数据来源和计算方法

### 1.1 数据来源

为了深入了解工程地面和自然地面物理性质的差异及对冻土的影响,在北麓河冻土工程综合观测站工程路面(沥青和砂砾路面)和自然地面(天然地面、高寒草原、高寒草甸)布设了风速、气压、温度、湿度、路面温度等气象参量的观测设备。沥青路面、砂砾路面、高寒草原、高寒草甸的湿度、温度、气压观测高度分别为 0.25、0.5、1.0、2.0 m;风速的观测高度分别为 0.25、1.0、2.0 m;地面温度观测仪器布设高度为 0.5 cm。天然地表湿度、气温、气压、风速、风向观测高度为 2.0、10.0 m(下页图 1)。观测场地基本满足近地面层理论中水平均匀下垫面的要求。在沥青路面和天然地表表面进行反照率的观测计算。观测仪器如下页表 1 所示。所有数据采集均采用 Campbell 公司生产的 CR3000 数据采集器,每 30 min 记录 1 次数据,本文采用 2009 年 8 月到 2010 年 12 月间的连续观测数据。

### 1.2 计算方法

表面温度为观测数据,反照率为观测计算数据。在数据处理过程中用相应的公式计算了粗糙度和总体输送系数。

#### 1.2.1 粗糙度

空气动力学粗糙度  $Z_0$  表示风速为 0 的高度,一般通过对中性条件下近地表层 2 个及以上高度风速资料进行对数廓线拟合求得,或利用弱不稳定层结下多个高度上的实测风廓线和理论风廓线做拟合



图 1 不同地面类型观测点

Fig. 1 Observation points of different ground types

得到<sup>[13]</sup>。因此,本文用风速对数拟合系数  $a$ 、 $b$  计算得到粗糙度为

$$\left. \begin{aligned} u_t &= a + b \ln(Z) \\ Z_0 &= e^{-a/b} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中: $u_t$  为高度  $Z$  处的  $t$  时刻风速。

1.2.2 总体输送系数

地面总体输送系数是湍流输送强度的重要参数,对认识不同地面加热强度的时空分布和变化规律有重要意义。鉴于自动气象观测要素的特点和精度,采用廓线-通量法计算沥青路面和天然地表的总体输送系数(式 2)。廓线-通量法是一种半经验方法,简便实用,对观测资料要求不高,应用广泛<sup>[14]</sup>。

$$\left. \begin{aligned} C_D &= \frac{k^2}{\ln(Z/Z_0) - \Psi_m(Z/L)^2} \\ C_H &= \frac{k^2}{[\ln(Z/Z_0) - \Psi_m(Z/L)][\ln(Z/Z_0) - \Psi_h(Z/L)^2]} \\ \Psi_m &= 2\ln\left(\frac{1+X}{2}\right) + \ln\left(\frac{1+X^2}{2}\right) - \\ &\quad 2\arctan\left(X + \frac{\pi}{2}\right) \\ \Psi_h &= 2\ln\left(\frac{1+y}{2}\right) \\ X &= (1-16\xi)^{0.25}, y = (1-16\xi)^{0.5}, \\ \xi &= \frac{Z}{L}, L = \frac{\bar{T}u_*^2}{kgq_*} \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

表 1 观测仪器

Tab. 1 Observation instruments

观测内容	观测仪器	精度	生产厂家
风速	010C/034B	0.11 m/s	Met One Company
温湿度	HMP45C	±1%	Vaisala Company
气压	CS100	±1.5 mb	Setra Company
地温	热敏电阻温度传感器	±0.05 ℃	冻土工程国家重点实验室
地面温度	IRR-P	±0.2 ℃	Apogee

式中: $C_D$ 为动量总体输送系数; $C_H$ 为热量总体输送系数; $k$ 为 Von Karman 常数,取 0.4; $Z_0$ 为粗糙度; $Z$ 为高度; $L$ 为莫宁-奥布霍夫长度; $\Psi_m$ 、 $\Psi_h$ 为稳定度修正函数; $u_*$ 为摩擦速度; $\theta_*$ 、 $q_*$ 分别为位温和比湿的特征尺度; $\bar{T}$ 为平均气温; $g$ 为重力加速度。

2 物理性质比较

2.1 表面温度

下图 2 给出了不同地面类型不同季节的地面温度日变化差异。不同地面类型不同季节地面温度日变化存在较大差异。白天各个地面类型温度差异较大,夜间温差较小。在春季 7:30 时,各个地面类型表面温度达到最小值;在 15:00 时,各个地面类型表面温度达到最大值。沥青路面的夜间温度均大于其他 3 种地面类型。沥青路面的日最低温度比其他地面类型要高 1.9 ℃~2.9 ℃。从日出到 15:00,砂砾路面温度高于其他地面类型,其余地面类型温度

差异较小(图 2(a))。在夏季 8:00 时,各个地面类型表面温度达到最小值;在 15:30 时,各个地面类型表面温度达到最大值。沥青路面昼夜温度均大于其他 3 种地面类型,沥青路面日最高温度比其他地面类型高 3℃~8℃;日最低温度比其他地面类型高 2℃~3℃。其他 3 种地面类型在不同的时间段内,不同的地面类型表面温度存在一定的差异(图 2(b))。在秋季,各个地面类型表面温度变化与春季基本相似,沥青路面日最高温度比其余地面类型高 3℃~5℃;日最低温度比其余地面类型高 2℃~3℃(图 2(c))。在冬季,各种地面类型表面温度变化与其他 3 个季节差异较大,沥青路面最高温度出现在 15:00,比其他地面类型推迟了 1 h;日最低温度均出现在 8:30。在 10:00~14:00 时间段内,沥青路面温度低于砂砾路面、高寒草甸、高寒草原表面温度;在 14:00~16:00 时间段内,砂砾路面和高寒草甸表面温度较高,沥青路面的温度仅比高寒草原表面温度高 1℃~2℃。其余时间段沥青路面的温度比其他地面类型高 2℃~4℃(图 2(d))。

在夏秋季节,沥青路面的昼夜温度均高于其他地面类型。春冬季沥青路面夜间温度高于其他地面类型。从日出到日最高温度出现的时刻,地面被加热,地面温度上升。沥青路面温度除冬季外,升温速率均大于其他地面类型。日最高温度出现后,太阳辐射强度减小,地面开始降温,沥青路面的降温速率又小于其他地面类型,冬季表现的尤为突出。植被对于夏季的冷却作用,冬季的保温作用,使得高寒草甸在太阳辐射加热时,温度增幅较小,冬季温度下降幅度也较小。砂砾路面表面颗粒粗糙,热容量小,在介质中积温较少,温度变化幅度大于有植被的地面类型。沥青路面抑制了夜间介质的能量散失,使得其夜间温度高于其他地面类型。

2.2 地表反照率

地表反照率是反射辐射与入射总辐射的比值。决定了多少辐射能量被地面所吸收,因而是地表能量平衡研究中的一个重要参数。地表反照率受天气状况、太阳高度角、地面类型、土壤湿度等要素的影响。如图下页 3 所示,天然地表的反照率大于沥青路面的反照率。天然地表的反照率是沥青路面反照率的 2~3 倍。沥青路面的反照率季节性变化不明显,全年在 0.1~0.2 之间。天然地表反照率全年有所波动在 0.18~0.39 之间,最小的反照率出现在 6~9 月,冬春季反照率较大,大于 0.25。

在晴朗的天气条件下,沥青路面的地表反照率

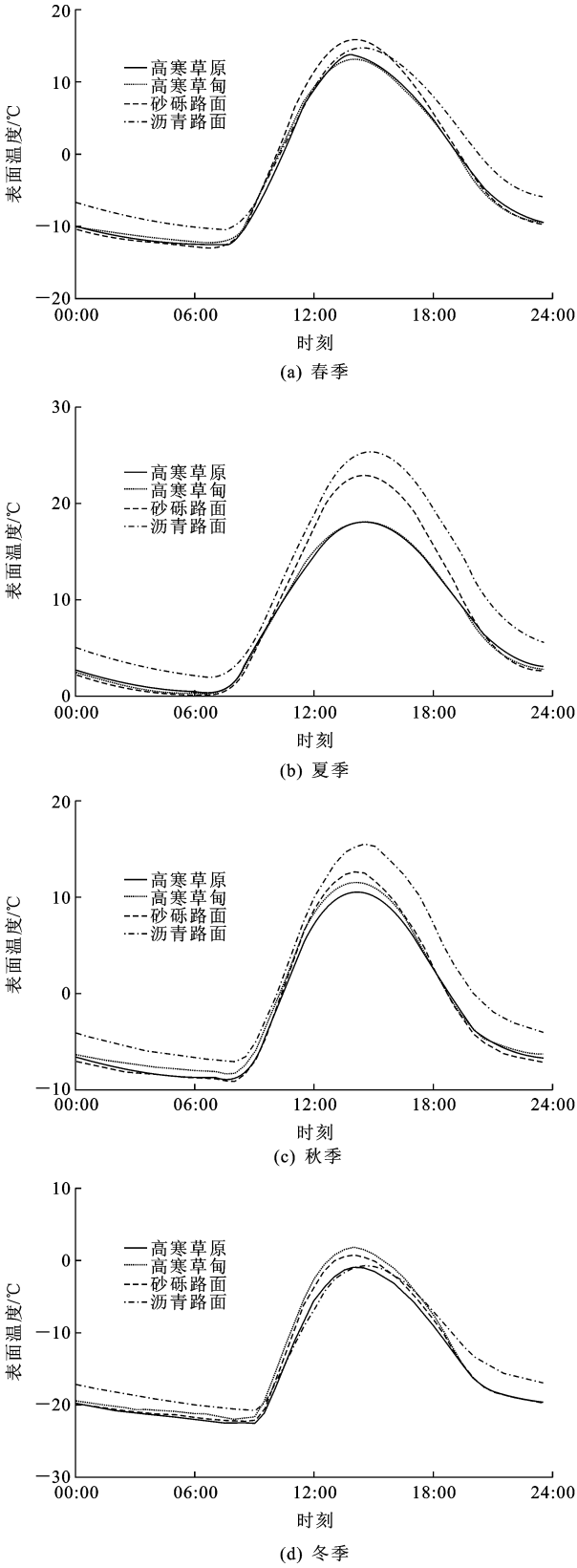


图 2 不同地面类型不同季节表面温度日变化特征

Fig. 2 Diurnal variation of surface temperatures about different ground types in different seasons

在 0.1~0.2 之间,天然地表反照率在 0.2~0.6 之间。受太阳高度角的影响,天然地表反照率随太阳

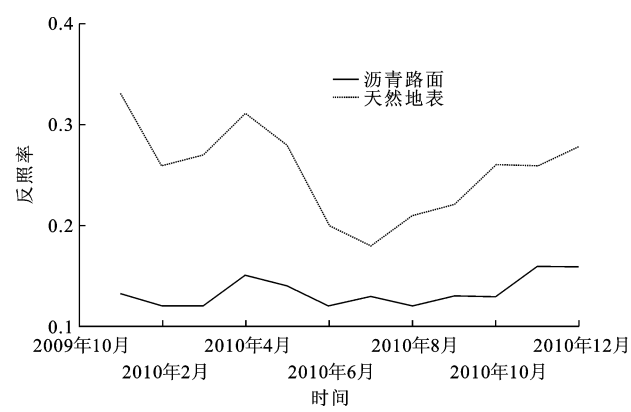


图 3 沥青路面和天然地表反照率年变化  
Fig. 3 Annual changes of albedo of asphalt pavement and natural surface

高度角增大呈指数减小,变化量在 0.2~0.4 之间(图 4(a))。降雨改变了地面湿度,降雨量的不同引起地面反照率的变化。2009 年 9 月 15 日,30 min 最大降雨量为 0.72 mm。在降雨时段(13:00~14:00),沥青路面的反照率增加,天然地表的反照率减小。15:00 这一降雨时段二者变化相反。15:30 这一降雨时段 2 种地面类型的反照率与 13:00 时段变化一致(图 4(b))。而 2010 年 4 月 17 日在降雨时段 2 种地面类型的反照率均是增加的,增加幅度为 0.6~0.7,大于太阳高度角的影响(图 4(c))。降雨时段根据降雨量的不同和地面湿度的情况,地面的反照率发生变化,可能增加也可能减小。但是,降雨后地面湿度增加,地面反照率减小。青藏高原降雪量较小,月降雪量小于 5 mm,积雪保存时间较短。新鲜雪的反照率很高,可达 0.9。降雪的条件使沥青路面反照率大幅增加(图 4(d))。

### 2.3 粗糙度

粗糙度的大小在一定程度上反映了近地表气流与下垫面之间的物质和能量交换、传输强度及它们之间相互作用的大小<sup>[15]</sup>。将北麓河观测场每 30 min 不同地面类型不同高度风速值拟合得到参数  $a$ 、 $b$ ,通过式(1)计算每 30 min 的平均粗糙度。各个地面类型粗糙度的季节变化规律不明显,各地面类型在秋季均有减小的趋势(下页图 5)。对这 5 种地面类型,砂砾路面粗糙度最大,其余依次为天然地表、沥青路面、高寒草甸、高寒草原。粗糙度在  $1.4 \times 10^{-3} \sim 3.8 \times 10^{-3}$  m 之间。

天然地表由稀疏短草覆盖,土壤由含有片石的砂壤土构成,植被覆盖度小于 10%;沥青路面表面为黑色沥青,较平整;砂砾路面表面为大颗粒的砾石;草原以高山蒿草为主,植被高度约为 10 cm;高

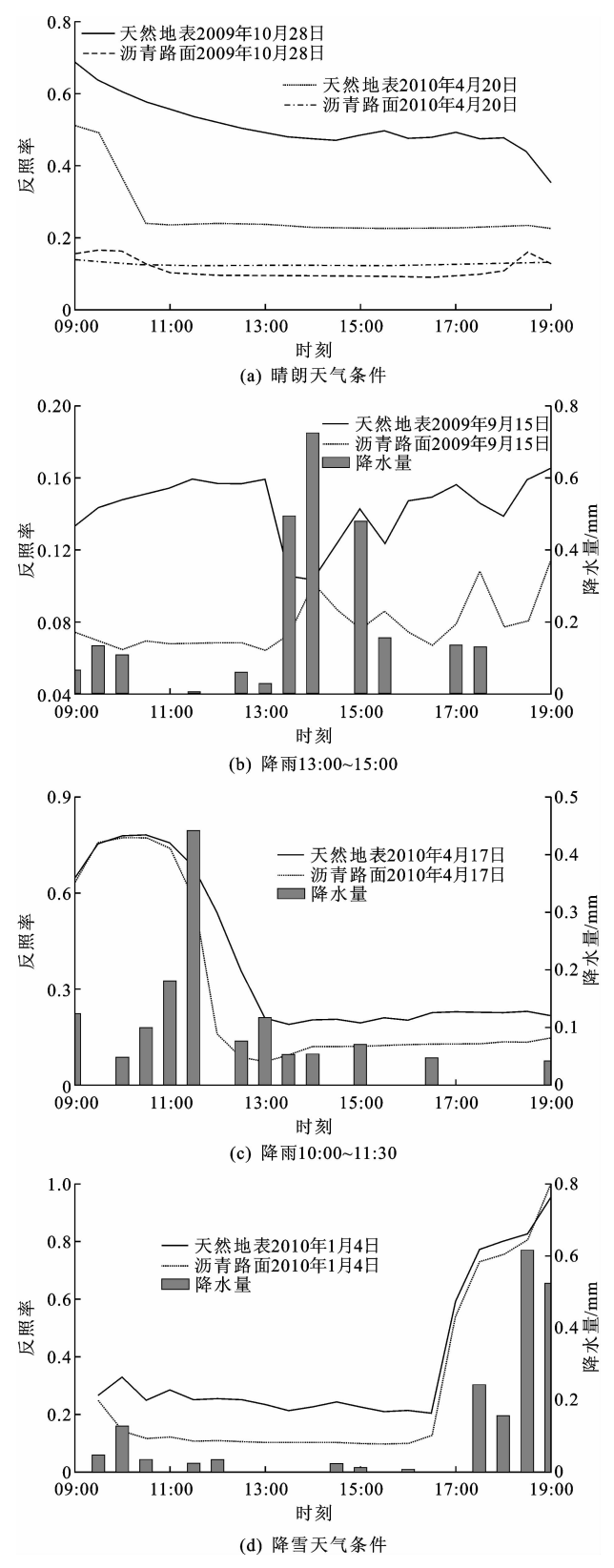


图 4 不同天气条件沥青路面和天然地表反照率  
Fig. 4 Albedo of asphalt pavement and natural surface under different weather conditions

寒草甸以矮蒿草、早熟禾、青藏苔草等为主,植被高度约为 5~10 cm。天然地表和砂砾路面表面均有

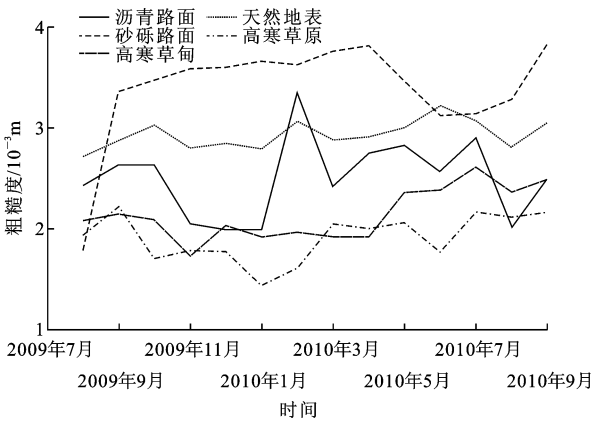


图5 不同地面类型粗糙度变化

Fig. 5 Changes of roughness of different ground types

大颗粒物,使得其粗糙度较大。沥青路面虽然是沥青及碎石的混合物,但是平整度较高,粗糙度略小于砂砾路面和天然地表(图5)。

对于高寒草原和高寒草甸来讲,高寒草甸的植被发育程度高于高寒草原,高寒草原的植被高度高于高寒草甸。风速在植被中被削减,植被内部的湍流交换削减,绝大部分动量在植被顶端被吸收。研究表明:植被稀疏时,植被越多,粗糙度越大;植被较为茂密时,植被越多,粗糙度越小。高寒草原和高寒草甸植被覆盖度中等,所以植被覆盖度越高粗糙度越高。高寒草原的粗糙度要低于高寒草甸。

2.4 总体输送系数

总体输送系数的差异表征地面能量输送的强弱。总体输送系数越大,对热量的输送能量越强,供地面吸收的能量就越少。高原的总体输送系数明显大于海洋表面的同类值( $1\times10^{-3}\sim2\times10^{-3}$ )。青藏高原近地层大气具有较大的层结不稳定性是导致其地面总体输送系数较大的主要原因<sup>[16]</sup>。

在北麓河地区不同地面类型的温度、湿度、风速梯度每30 min数据观测的基础上,计算莫宁-奥布霍夫长度。利用式(2)计算稳定度修正函数,进而得到不同地面类型的总体输送系数。计算结果显示:北麓河观测场动量输送系数在 $2.3\times10^{-3}\sim3.2\times10^{-3}$ 之间,见表2。天然地表总体输送系数最大,其余依次为沥青路面、高寒草原、高寒草甸、砂砾路面。不同地面类型总体输送系数在季节上有差异。总体来讲,冬季天然地表动量输送系数大于其他地面类型。在其他季节,天然地表和沥青路面的动量输送系数较大,其余依次为高寒草原、高寒草甸、砂砾路面。北麓河观测场热量输送系数在 $2\times10^{-3}\sim4\times10^{-3}$ 之间,大于动量输送系数。冬季天然地表热量输送系数大于其他地面类型,在其他季节,天然地表的热量输送系数最大,其余依次为沥青路面、高寒草

原、高寒草甸、砂砾路面。表现为砂砾路面的总体输送系数较小,天然地表的总体输送系数较大。

表2 不同地面类型的平均总体输送系数

Tab. 2 Average bulk transfer coefficients of different ground types

	mm				
类型	天然地表	沥青路面	砂砾路面	高寒草原	高寒草甸
动量输送系数	3.02	2.89	2.52	2.77	2.67
热量输送系数	3.18	2.73	2.38	2.61	2.50

总体输送系数受地表类型粗糙度、植被覆盖度、风速等因素的影响。在不稳定条件下,粗糙度越高,不利于向湍流发展。粗糙度较小时,总体输送系数随风速的增加不断增大,趋于中性层结的总体输送系数。植被发育情况也影响地面的总体输送系数。总体输送系数间接地反映了不同地面类型对潜热和感热的输送能力。

3 结 语

(1)在夏秋季节,沥青路面的昼夜温度均高于其他地面类型。春夏季沥青路面夜间温度高于其他地面类型,日最高温度到0:00这一时间段沥青路面温度降幅较小,热量散失能力较差。高寒草原、高寒草甸夏季增温、冬季降温速率小于工程地面。反照率受太阳高度角、降雨、降雪条件的影响。沥青路面反照率小于天然地表,沥青路面对太阳辐射的反射小于天然地表。在日出时段地面反照率随太阳高度角的增加呈指数减小,在降雨时段反照率有增有减,降雨结束后反照率减小,降雪增大地面反照率。

(2)不同地面类型的粗糙度关系从大到小依次为砂砾路面、天然地表、沥青路面、高寒草甸、高寒草原,粗糙度受地面平整度及植被情况的影响。粗糙度越大越容易形成湍流。总体来讲,冬季天然地表输送系数大于其他地面类型。在其他季节,天然地表和沥青路面的动量输送系数较大,其次为高寒草原、高寒草甸、砂砾路面。

(3)在本文研究基础上,进一步分析不同地面类型的浅层水热动态变化过程以及与气温和湿度变化的关系,将会对工程地面吸热的热量来源有更加明确的认识。

参考文献:

References:

[1] Lachenbruch A H. Permafrost, the active layer, and changing climate[R]. Washington DC: Open-File Report 9, 1994.

[2] 王 慧,李栋梁,胡泽勇,等.陆地上总体输送系数研究进展[J].地球科学进展,2008,23(12):1249-1259.

WANG Hui,LI Dong-liang,HU Ze-yong,et al. A re-

- view of the study of the bulk transfer coefficients over the land[J]. *Advances in Earth Science*, 2008, 23(12):1249-1259. (in Chinese)
- [3] 李 韧,赵 林,丁永建,等. 青藏高原北部不同下垫面土壤热力特性研究[J]. *太阳能学报*, 2013, 34(6): 1076-1084.
- LI Ren, ZHAO Lin, DING Yong-jian, et al. Study on soil thermodynamic characteristic at different underlying surface in northern Qinghai-Tibet plateau[J]. *Acta Energiæ Solaris Sinica*, 2013, 34(6):1076-1084. (in Chinese)
- [4] 李 韧,赵 林,丁永建,等. 青藏高原北部活动层土壤热力特性的研究[J]. *地球物理学报*, 2010, 53(5): 1060-1072.
- LI Ren, ZHAO Lin, DING Yong-jian, et al. A study on soil thermodynamic characteristics of active layer in northern Tibetan plateau[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2010, 53(5):1060-1072. (in Chinese)
- [5] 郭亚娜,潘益农. 粗糙度和稳定度对绿色生态系统能量平衡的影响[J]. *南京大学学报:自然科学版*, 2002, 38(6):820-827.
- GUO Ya-na, PAN Yi-nong. The Influence of roughness and stability on the energy balance of oasis ecosystem[J]. *Journal of Nanjing University: Natural Sciences*, 2002, 38(6):820-827. (in Chinese)
- [6] 马耀明,姚檀栋,王介民,等. 青藏高原复杂地表能量通量研究[J]. *地球科学进展*, 2006, 21(12): 1217-1223.
- MA Yao-ming, YAO Tan-dong, WANG Jie-min, et al. The study on the land surface heat fluxes over heterogeneous landscape of the Tibetan plateau[J]. *Advances in Earth Science*, 2006, 21(12):1217-1223. (in Chinese)
- [7] 孙 俊,胡泽勇,陈学龙,等. 黑河中上游不同下垫面动量总体输送系数和地表粗糙度对比分析[J]. *高原气象*, 2012, 31(4):920-926.
- SUN Jun, HU Ze-yong, CHEN Xue-long, et al. Comparative analysis on moment bulk transfer coefficients and roughness length under the different underlying surfaces in upper and middle reaches of heihe river basin[J]. *Plateau Meteorology*, 2012, 31(4):920-926. (in Chinese)
- [8] 姚济敏,谷良雷,赵 林,等. 多年冻土区与季节冻土区地表反照率对比观测研究[J]. *气象学报*, 2013, 71(1):176-184.
- YAO Ji-min, GU Liang-lei, ZHAO Lin, et al. Comparatively permafrost region and the seasonally frozen soil region[J]. *Acta Meteorological Sinica*, 2013, 71(1):176-184. (in Chinese)
- [9] 库德里雅采夫 B A. 工程地质研究中的冻土预报原理[M]. 郭东信,马世敏,丁德文,等,译. 兰州:兰州大学出版社,1992.
- Kudryavtsev B A. Principle of frozen soil forecast in engineering geology research [M]. Translated by GUO Dong-xin, MA Shi-min, DING De-wen, et al. Lanzhou: Lanzhou University Press, 1992. (in Chinese)
- [10] 朱东鹏,汪双杰,司 伟,等. 青藏高原多年冻土区高等级公路路面结构温度场研究[J]. *公路交通科技*, 2013, 30(8):29-36.
- ZHU Dong-peng, WANG Shuang-jie, SI Wei, et al. Study on temperature field of high-grade highway pavement structure in Qinghai-Tibet plateau permafrost regions[J]. *Journal of Highway and Transportation Research and Development*, 2013, 30(8):29-36. (in Chinese)
- [11] 黄以职,郭东信. 青藏公路昆仑山垭口、斜水河路段路基热状态及稳定性研究[R]. 兰州:中国科学院兰州冰川冻土所,1996.
- HUANG Yi-zhi, GUO Dong-xin. Research on thermal state and the stability of the roadbed of Kunlun pass and Xieshui section, Qinghai-Tibet highway [R]. Lanzhou: Lanzhou Institute of Glaciology and Geocryology, 1996. (in Chinese)
- [12] 张中琼. 多年冻土区沥青路面热效应机理研究[D]. 兰州:中国科学院寒区旱区环境与工程研究所,2012.
- ZHANG Zhong-qiong. Study on the mechanism of asphalt pavement's thermal effects in permafrost regions[D]. Lanzhou: Cold and Arid Region Environmental and Engineering Research Institute China Academy of Science, 2012. (in Chinese)
- [13] Verkaik J W, Holtslag A A M. Wind profiles, momentum fluxes and roughness lengths at Cabauw revisited [J]. *Boundary-Layer Meteorology*, 2007, 122(3): 701-719.
- [14] 李国平,赵邦杰,卢敬华. 青藏高原总体输送系数的特征[J]. *气象学报*, 2002, 60(1):60-67.
- LI Guo-ping, ZHAO Bang-jie, LU Jing-hua. Characteristics of bulk transfer coefficients over the Tibetan plateau[J]. *Acta Meteorological Sinica*, 2002, 60(1): 60-67. (in Chinese)
- [15] Asaeda T, Ca V T, Wake A. Heat storage of pavement and its effect on the lower atmosphere[J]. *Atmospheric Environment*, 1996, 30(3):413-427.
- [16] 孙卫国,刘树华. 农田植被层上方湍流量输送特征分析[J]. *南京气象学院学报*, 1998, 21(2):251-257.
- SUN Wei-guo, LIU Shu-hua. Analysis of transfer characteristics of turbulent flux over canopy of field crops[J]. *Journal of Nanjing Institute of Meteorology*, 1998, 21(2):251-257. (in Chinese)