

热示踪法对广州城市化地下温度影响的辨识*

连健斌¹, 李绍恒¹, 陈建耀¹, 龚柔艳², 梁贝竹¹, 董林焱³

1. 中山大学地理科学与规划学院 / 粤北岩溶区森林生态系统碳水耦合野外观测研究站, 广东广州 510006
2. 湖南农业大学水利与土木工程学院, 湖南长沙 410000
3. 长江水利委员会长江科学院, 湖北武汉 430000

摘要: 浅层地温和近地表空气温度之间存在内在能量交换, 随着时间推移, 地表温度变化的信息会向下传播, 并叠加到稳态地温场上。因此, 可通过当前地温剖面, 反过来重建地面温度变化的历史。为评估全球变暖和城市化对广州地下温度的综合影响, 本文收集了广州站自1958—2022年的气温数据并对这段时期的气温数据进行回归分析和距平分析, 获得了广州16个观测钻孔的温度-深度剖面; 再利用温度-深度剖面下段进行回归分析, 得到地温梯度以及偏离恒定地温梯度的深度; 最后, 结合气温数据得到开始增温时间和增温幅度, 运用解析解方程得到广州地表增温下温度-深度剖面的理论曲线。结果显示广州气温在1958—2022年间的增温速率为 $0.33\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{a}$, 开始增温的时间为1987年, 增温幅度为 $2.6\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。广州区域观测到的地温梯度值为 $0.036\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{m}$, 而地温偏离恒定地温梯度的深度为 54.8 m , 与通过解析解计算得到的理论深度 57.6 m 基本一致。研究发现城市化导致的地表变暖开始时间越早, 地下温度与恒定地温梯度偏离的深度越大, 表明城市区域地温偏离恒定地温梯度的深度可作为描述城市化进程的一个指标。

关键词: 全球变暖; 城市化; 气温; 地温; 广州

中图分类号: P641 **文献标志码:** A **文章编号:** 2097-0137(2024)04-0029-08

The identification of the influence of heat tracing method on underground temperature in the urbanization process of Guangzhou

LIAN Jianbin¹, LI Shaoheng¹, CHEN Jianyao¹, GONG Rouyan², LIANG Beizhu¹, DONG Linyao³

1. School of Geography and Planning / Carbon-Water Research Station in Karst Regions of Northern Guangdong, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510006, China
2. College of Water Resources and Civil Engineering, Hunan Agricultural University, Changsha 410000, China
3. Changjiang River Scientific Research Institute, Wuhan 430000, China

Abstract: The intrinsic energy exchange exists between the shallow ground temperature and near-surface air temperature. As time progresses, surface temperature changes are propagated downwards and superimposed onto the steady-state geothermal field. Therefore, it is possible to reconstruct the history of ground surface temperature changes using the current subsurface temperature profile. To assess the

* 收稿日期: 2023-12-19 录用日期: 2024-04-02 网络首发日期: 2024-04-24

基金项目: 国家重点研发项目(2023YFC3709002); 国家自然科学基金(41977171);
广东省区域联合基金(2021A1515110505)

作者简介: 连健斌(1999年生), 男; 研究方向: 城市化地下水环境效应;
E-mail: lianjb3@mail2.sysu.edu.cn

通信作者: 陈建耀(1966年生), 男; 研究方向: 环境水文学、水文地质学;
E-mail: chenjyao@mail.sysu.edu.cn



ZR20230044

combined effect of global warming and urbanization on the subsurface temperature of Guangzhou, this paper collected temperature data from Guangzhou station during 1958-2022 and conducted regression analysis and anomaly analysis. Meanwhile, the temperature-depth (T-Z) profiles of 16 observation boreholes in Guangzhou were obtained through field measurements. By conducting regression analysis on the lower section of the temperature profile, the geothermal gradient of the area and the depth of deviation from the constant geothermal gradient were determined. Finally, the onset time and magnitude of warming were obtained by combining temperature data, and the theoretical curves of the surface warming profile in Guangzhou were derived using the analytical solution equation. The results show that the warming rate of air temperature in Guangzhou from 1958 to 2022 is 0.33 °C per decade, with the onset time of warming being 1987, and the magnitude of warming being 2.6 °C. The observed geothermal gradient in Guangzhou is 0.036 °C/m, and the depth of deviation from the constant geothermal gradient is 54.8 m, essentially consistent with the analytically calculated depth of 57.6 m. The study finds that the earlier the start time of urbanization-induced surface warming, the greater the depth of deviation of subsurface temperature from the constant geothermal gradient, indicating the depth of deviation can be used to describe the process of urbanization.

Key words: global warming; urbanization; air temperature; ground temperature; Guangzhou

全球变暖引发了一系列生态环境问题,受到了国内外学者的高度重视。1900—2019年全球平均表面温度的变暖趋势为每100年升高(0.9±0.1)°C,在此大背景下中国相应上升了1.3~1.7°C(丁一汇等,2006)。全球暖化导致的增温效应不仅对地面及以上部分造成影响,还会对地下温度场产生影响;目前全球变暖的问题研究大多集中在地面及以上区域,很少涉及地表暖化对地下温度的影响。城市化导致的全球变暖和城市热岛在很多城市造成了热异常(Liu et al., 2004),研究表明在钻孔中测量的温-深剖面可以作为过去大气温度变化和全球变暖的长期记录(Harris et al., 1997)。

地表温度的变动通过热传导效应向地层深处传递,从而对地温梯度曲线产生影响(Huang et al., 2000)。因此,地温梯度可以有效反映地表温度变化、气候变暖等气候变化特征。Birch(1948)最早利用地温数据重构地表温度变化, Pollack et al. (2000)利用钻孔温度数据重建了过去几个世纪的地表温度历史, Kurylyk et al. (2009)推导了一维瞬态传导-对流方程的解析解来研究地下温度对气候变化的响应。这些研究都尝试解释气候异常与地下温度异常之间的关系。

随着城市化的飞速发展,人们开始关注在全球气候变暖的大背景下城市热岛环境对地下温度的影响。Ferguson et al. (2004)发现加拿大温尼伯地下温度场与周边农村地区有显著差异; Taniguchi et al. (1999)对东京都市圈的地温研究发现,该地区

浅层含水层温度的升高是由地表变暖引起的,并得出结论:在地表变暖的条件下,地下的温-深曲线在浅层区域将会向右发生偏移,且偏移程度的大小受到地表增温的速率与幅度的影响。随后 Taniguchi et al. (2007)又对东京、大阪、首尔、曼谷4个亚洲大型城市的地下温度进行研究,以评估城市化和全球变暖对地下温度的影响。董林垚等(2018)利用日本熊本平原的地温数据探究气候变化与城市热岛效应对地表变暖的贡献率大小;王海波等(2014)对中国西安城市与郊区的钻孔温度增幅进行了对比分析,发现西安地区城郊地温升幅大小与所在地区的城市化进程一致。目前国内有关城市地温与气候变化之间的关系研究还较少。

本文旨在揭示广州城市化对地下温度的影响,以为城市化进程的评估提供新的视角。此外,城市化和气候变化之间关系的深入认识,可为城市规划中气候适应策略的制定提供科学依据。

1 研究区域与数据

广州市位于中国大陆的南部,地理位置为112°57'~114°3'E, 22°26'~23°56'N,东临南海的珠江口,南与香港相邻;经济上为发达的珠江三角洲中心;截至2021年3月,其总人口已经超过1500万;气候类型为湿润的亚热带季风气候,虽降雨量充沛,但受到地形和水汽条件等因素的影响,其降水量具有时空分布不均和干旱交替发生等特点。在时间上,降雨主要集中在夏季和秋季,

其中4~9月是降水最多的月份;在空间上,降水量从南部平原区向东北部丘陵区递增,降水量山区多于平原,北部多于南部。广州境内水道密布,河流纵横交错,水资源丰富。广州的年均气温约为22℃,近年来呈显著增暖趋势,许多研究表明广州的快速城市化进程导致其城市热岛效应显著增强(王惠英等,2004)。

2 研究方法

2.1 温深数据采集

本研究选取位于广州城区和郊区的16个钻孔(见图1)。其中,12个钻孔深度为60~100 m,4个深度大于100 m。使用的设备仪器为ATD-HR500m小型水温-深度计,内设压力传感器和温度传感器2个探头,可同时记录水深与对应点的温度,仪器测量精度为0.001℃;测量地温时,每隔1 m采集一次地温数据。分别在2023年1月16日和8月19日完成冬季和夏季的地温数据采集。

2.2 研究区气温数据

选取1958—2022年广州气象站的历史气温数据,以代表广州市区地表气温变化;选取1958—2014年广州郊区从化气象局历史气温数据,以代表广州郊区的地温变化。广州气象卫星地面站位于广州市区,并且广州站在1996年经过了一次迁站,根据Fan et al.(1993)的研究对广州站点1996年以后的气温数据进行了修正,增加0.92℃。

2.3 水热同流方程

通常,地温随深度增加会逐渐升高,增加幅度与所处的地质构造有关。在不考虑其他因素的影响下,地温与深度大致呈线性关系,被称为地温梯度(Anderson,2005)。地温梯度一般是通过对钻孔数据在相对较大深度的温深数据进行拟合所得到的。地温梯度还受到地下水流动以及地表温度变化的影响,温度与深度的关系并不会严格遵循线性规律,其偏离程度可反过来用来研究地表暖化和地下水流速的影响程度。

一般来说,地表温度的日变化只会影响到地下不到1.5 m的深度,而地表温度的季节性变化的影响可以到达地下十几米的深度(Silliman et al.,

$$T(z,t) = T_0 + G(z - Ut) + \left(\frac{b + GU}{2U} \right) \left[(z + Ut) e^{\frac{Uz}{k}} \operatorname{erfc} \left(\frac{z + Ut}{2\sqrt{kt}} \right) + (Ut - z) \operatorname{erfc} \left(\frac{z - Ut}{2\sqrt{kt}} \right) \right], \quad (2)$$

式中 $T(z,t)$ 为任意时刻 t 位于 z 处的地温; b 为地表温度上升速率; T_0 为稳态地表温度; G 为平均地温

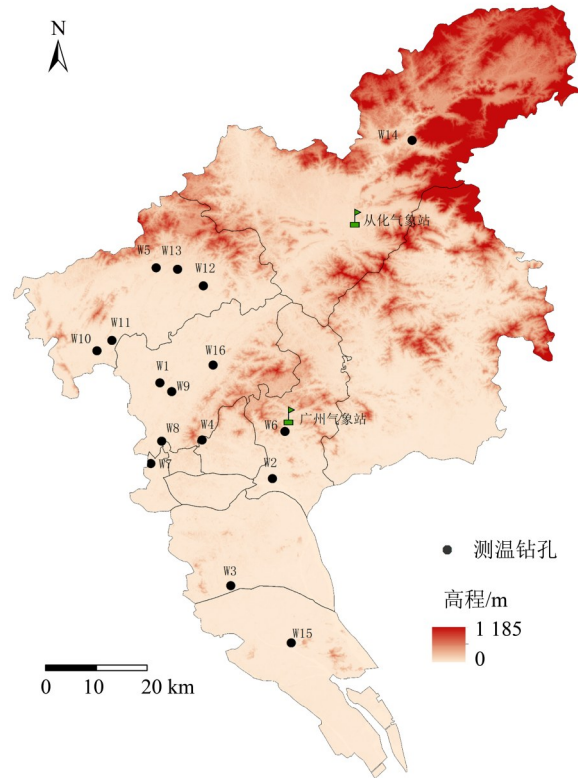


图1 研究区域、观测钻孔和气象站位置分布

Fig. 1 Distribution map of study area, observation boreholes and meteorological stations

1993),全球变暖和城市热岛的综合效应对地温的影响甚至可以达到地下100 m以下(Taniguchi et al.,2007)。假设地温变化是连续的,可得到均质且各向同性的多孔介质一维非稳定水热同流迁移的控制方程(Taniguchi et al.,1999)

$$\frac{\partial^2 T}{\partial z^2} - \frac{c_0 \rho_0}{k} \frac{\partial(v_z T)}{\partial z} = \frac{c\rho}{k} \frac{\partial T}{\partial t}, \quad (1)$$

式中 T 表示地温; z 表示垂直方向的深度; t 表示时间; k 为地层的热扩散系数; c_0 为水的热容; ρ_0 为水的密度; c 为含水层的热容; ρ 为含水层的密度; v_z 为地下水垂直通量。

Taniguchi et al.(2009)将城市地表温度条件设定为从过去的某一时间开始增温且呈线性变化,并考虑地下水渗流的影响,从而求出地温与深度的解析解方程

梯度; erfc 表示误差余函数; $U = \frac{v_z c_0 \rho_0}{c\rho}$ 。

上述解析解可以计算在地表不同增暖速率与

增暖时间下的地下温深剖面, 探究研究区域内地表暖化时间与地温偏离恒定深度之间的关系, 进而判断城市化与地温之间的关系。

3 结果与分析

3.1 地温曲线初步分析

广州冬季(1月)与夏季(8月)的钻孔温-深剖面(图2)显示, 由于受到地表季节性温度变化的影响, 地表下0~15 m深度范围地温变化剧烈。在冬季, 地表温度降低, 温深曲线大多向左偏转; 而在夏季, 地表温度升高, 温深曲线大多向右偏转。此变化主要是由大气季节变化和地面热状况之间的热耦合引起的(Taylor et al., 2009); 在15~25 m深度范围, 地层温度基本保持不变, 形成恒温层; 而在25 m以下, 地温与深度呈线性增加趋势, 形成增温层。增温层的温度受地热影响, 因此较为稳定。在深层区域的温深曲线大多呈现线性关系, 这表明深层未受到多年城市热岛的影响, 而有些钻孔的深层区域的曲线发生突变则可能是由于受到地下水渗流的干扰。

图3显示了广州的温深剖面2个季节的平均值、标准差以及地温梯度, 可以得出广州的地温梯度约为 $0.036\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{m}$ 。在图3中标注了根据地温梯度计算得出的理论地表温度以及基于实测地下温度平均值推算的实际地表温度, 理论地表温度比实际地表温度低 $2.6\text{ }^{\circ}\text{C}$, 这表明地表正在经历变暖过程。全球气候变暖导致地表温度整体上升, 但城市内部热量释放导致地表温度上升, 土地覆盖类型的改变影响地表能量平衡也对地表暖化造成影响(Shimada et al., 2014)。

3.2 广州市气温与地温变化分析

3.2.1 气温变化与城市热岛 图4显示了1958—2022年广州市年气温距平和5 a平均气温距平, 由图可以看出, 1958—1986年期间气温波动大且没有明显的增温趋势; 自1987年开始, 气温逐渐缓慢上升, 大约在1996年发生了显著的气温跳跃现象, 随后快速升温, 增温趋势与全国的气温变化趋势基本一致(刘凯等, 2020)。1958—2022年期间, 广州气温增温速率为 $3.3\text{ }^{\circ}\text{C}/100\text{a}$, 显著高于同期全球的 $0.5\text{ }^{\circ}\text{C}/100\text{a}$ (Hansen et al., 1987), 很难用全球变暖(Parker et al., 2006)来解释, 很可能受到广州市快速城市化过程中的土地利用变化、建设活动和人口增长等因素往往会加剧城市热岛效应, 从而对气温产生重要影响。

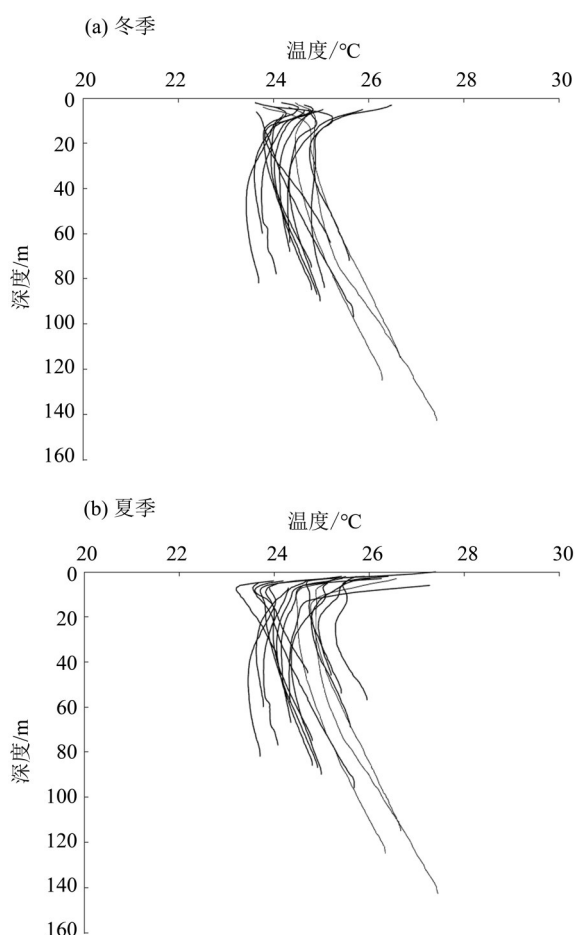


图2 16个钻孔冬夏两季的实测温深剖面

Fig. 2 The ground temperature-depth profiles of 16 boreholes measured in January and August

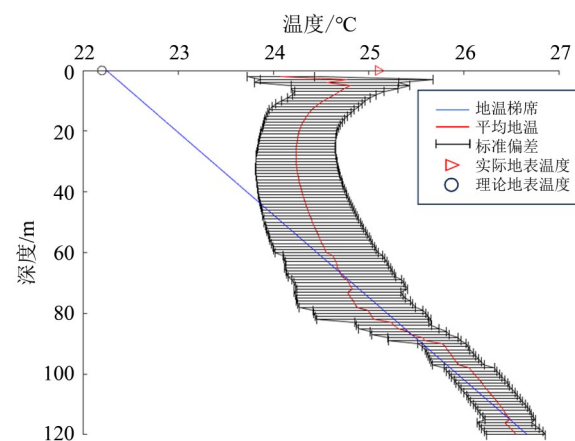


图3 广州的平均地温剖面、标准偏差、估计的理论地表温度和估计的地温梯度

Fig. 3 The average and standard deviation of profiles with estimated theoretical surface temperature shown by solid circle and estimated geothermal gradient in Guangzhou

广州市快速城市化进程导致大规模的土地利用变化, 改变了地表和地下的热量分布。城市建

设和开发活动改变了地形,影响了地表温度分布。随着城市化加速,广州地区的城市热岛效应显著,城市内部气温明显高于郊区(封静等,2011)。工业排放(吴艳标,1986)、交通运输等释放大量热量,使得城市内部气温持续攀升。

城市热岛(UHI, urban heat island)强度是衡量城市热岛的重要指标(周凯等,2008),通常采用地表温度差异来描述,即用城市中心区域的地表温度与周边乡村地区的地表温度的差值。通过比较广州卫星气象地面站与从化气象局年平均气温的差值,可以计算出城市热岛强度。图5所示,1958—2014年间,广州城市热岛强度呈现显著上升趋势。这种趋势与广州城市规模扩大、下垫面性质变化、植被减少、温室气体排放等因素密切相关(樊亚鹏等,2014)。城市化过程引发的土地利用变化和热源释放加剧了城市热岛效应,进而影响当地气温变化趋势(Kalnay et al., 2003)。随着城市化发展加速,城市热岛效应对人类生活环境和健康产生着不可忽视的影响(杨士弘等,1984)。

3.2.2 地表暖化对地温的影响 地表温度对地下温度的影响会随着深度增加而逐渐减弱,其影响深度为10~15 m,而数十年的累计效应则可影响到地下数十米的深度(Ferguson et al., 2004)。根据图4分析的结果,广州自1987年开始出现明显的暖化现象,即1987年为广州地表增温的起始年份。为了剔除地表温度变化对地下温度的影响从而获得较为准确的地温梯度的估计值,本次研究对广州每个钻孔冬夏两季平均后的温深数据进行拟合,从而得到了每个钻孔所在区域地表暖化对地下温度影响的最大深度。在进一步去除季节气温变化

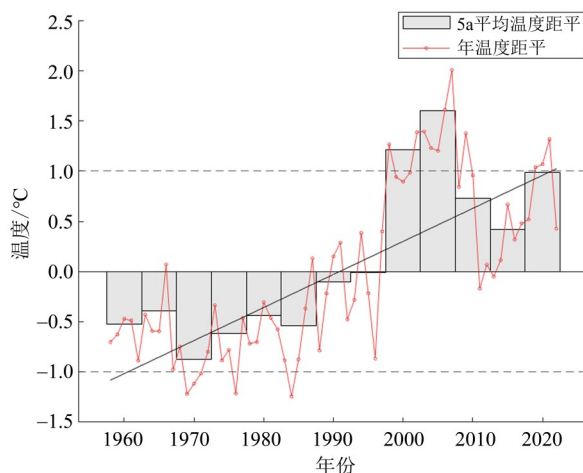


图4 广州市气温变化趋势

Fig. 4 The air temperature change trend in Guangzhou city

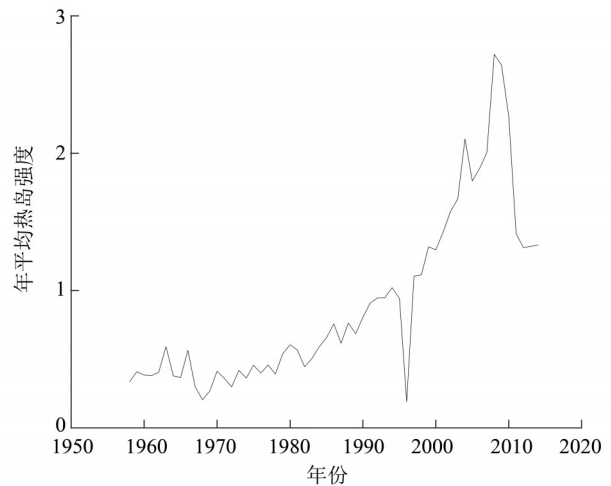


图5 1958—2014年广州市城市热岛强度的年平均变化

Fig. 5 Variations of annual mean UHI intensity in Guangzhou during 1958-2014

的基础上,尽可能采用地温随深度呈近似线性变化的区间地温数据进行拟合。本次研究所测的16个钻孔在深层区域均具有良好的线性关系。

选取实测地温开始偏离地温梯度时的深度作为地表暖化对地下温度影响的最大深度,可以发现位于城区的钻孔其最大偏离深度基本为60 m,而郊区钻孔的最大偏离深度为50 m(图6),这种显著的城乡差异性,表明广州城市化地区的地表暖化效应更加显著。结合气候变暖影响,预计未来随着城市化进程持续,城区地下温度将出现更大的变化。以W4和W14为例,W4位于广州市区,其最大偏离深度为64 m;而W14位于郊区,其最大偏离深度只有48 m;这可能是由于城市区域的地表暖化不仅受到气候变化的影响还受到城市热岛的作用,而郊区的城市热岛效应较弱,对地下温度的影响也相应较小。观测钻孔W3、W6、W9和W15的温深曲线在局部还出现了不同程度的凹凸现象,可能是受到了地下水渗流的影响。如W3在60~100 m的深度范围出现下凹的现象,这可能是受到垂直向下的地下水渗流的影响;而W6(20~50 m)、W9(45~70 m)、W15(30~50 m)在各自的深度范围出现了下凸的现象,由于深度较浅,可认为是受到长期地表暖化效应和向下的地下水渗流的共同影响。

将计算得到的16个钻孔的最大偏离深度进行算数平均,来代表整个广州市城市化过程中地表变暖对地下温度影响的深度,为54.8 m。随着未来城市的发展和人类活动的增加,地表温度升高会逐渐传导到更深的地层,导致地下温度场分布发

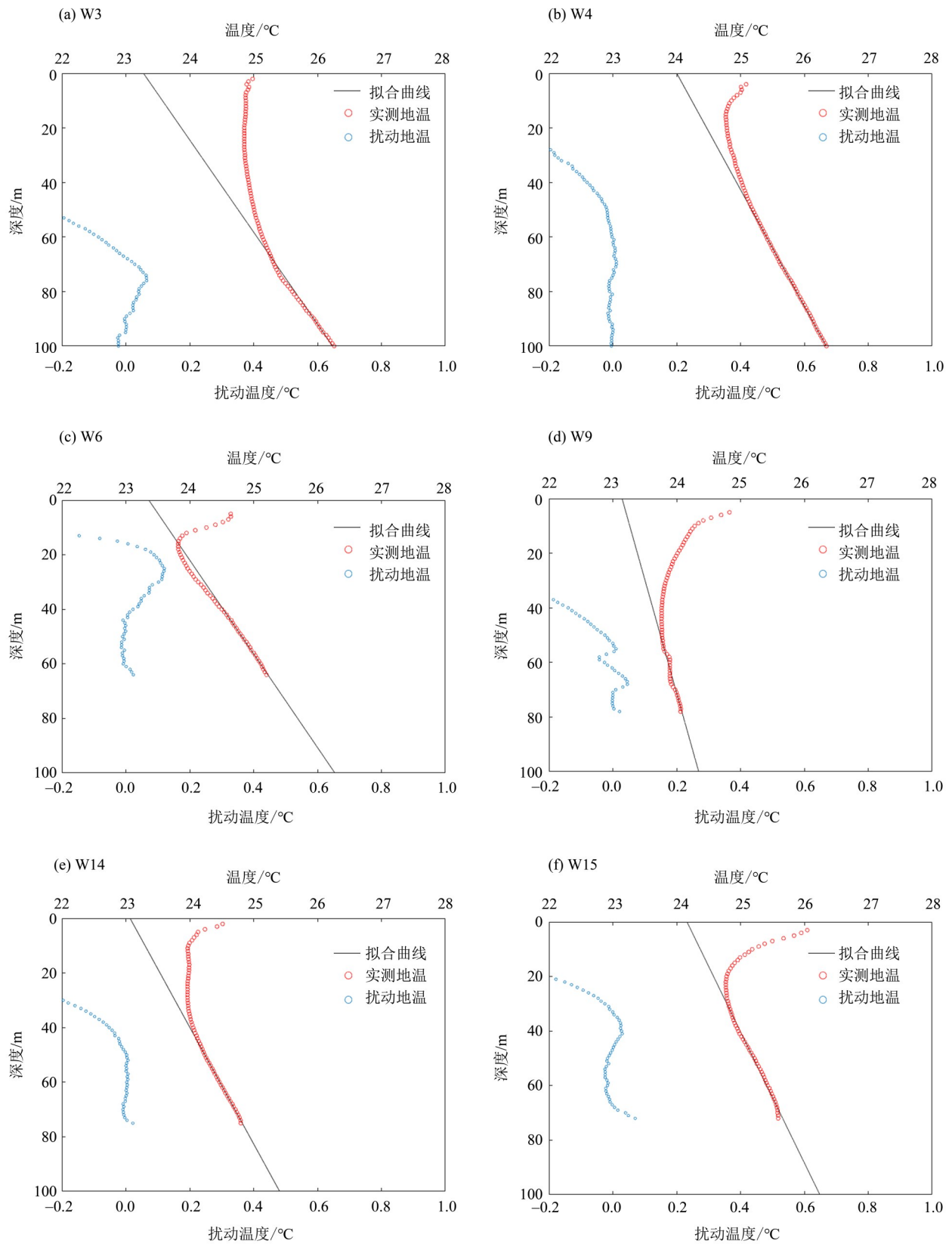


图6 广州各钻孔线性拟合结果和扣除线性分量以后的地温扰动量
Fig. 6 The linear fitting results and the temperature perturbation after deducting the linear component for various boreholes profiles in Guangzhou

生变化, 极度影响到城市地下生态环境。

3.3 地温对城市化的辨识

为了评价城市化开始时间对地下温度的影响, 利用式(2)计算地表不同增温速率与增温时间下的温度变化, 可得温度-深度剖面(图7)。通过比较地表变暖的时间和偏离恒定梯度的深度, 可以观察到一个明显的趋势: 随着城市化引起的地表变暖时间增加和地表变暖速度加快, 地温偏离恒定梯度的深度逐渐增加。为了进一步呈现这一关系, 图7中得到的理论曲线被用于图8, 以展示在不同地表变暖幅度下, 地表变暖时间与偏离恒定梯度深度之间的关系。这种关系有助于我们更全面地理解城市化对地表温度和地下热环境的影响。

由图7可知, 通过推算出广州城市地表变暖的时间以及变暖的幅度可估计出偏离恒定梯度的深度的理论值。根据图3与图4, 可以估计得到广州在1987年(36 a前)气温开始上升, 上升幅度为2.6 °C。将此结果合并到图8中, 得到广州地温偏离深度的估计值为57.6 m, 与实测深度(54.8 m)基本一致。地下温度的异常除了受到地表变暖的影响以外还受到浅层地下水的影响, 在本模型中只考虑了地表暖化效应而忽略了地下水流速的影响, 但最终得到的偏离深度与实际观测深度基本一致, 这在一定程度上可以表明广州地下的流动效应对地温影响较小。

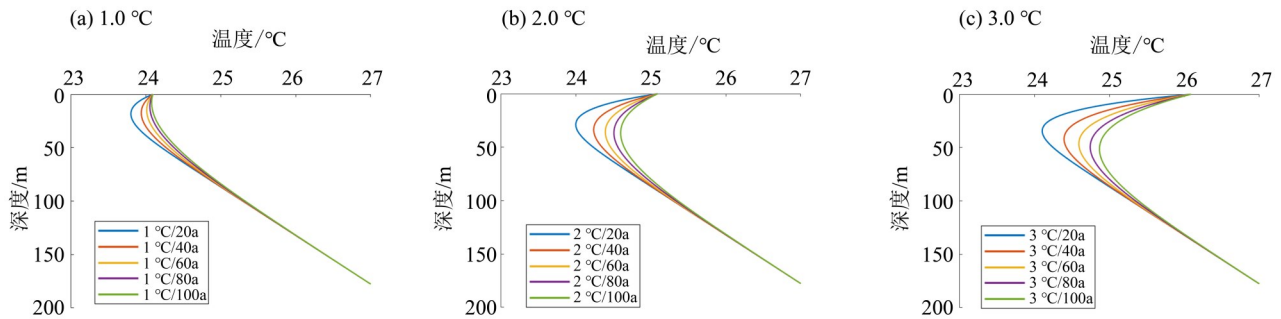


图7 使用公式(2)计算的地表增温值为1.0、2.0和3.0 °C的温度-深度剖面

Fig. 7 Temperature-depth profiles calculated using Eq. (2) with surface warming (bt) values of 1.0, 2.0, and 3.0 °C

Taniguchi et al. (2005) 曾经测算熊本、曼谷、大阪、东京、首尔的地表开始变暖的时间以及气温上升的幅度关系如图8所示, 图8表明了地表开始变暖所经过的时间与偏离恒定梯度的深度的关系, 即当城市化导致的地表变暖开始的时间越长, 地下温度与恒定地温梯度发生偏离的深度越深。因此可以推断出, 广州城市化进程大于曼谷与熊本, 低于首尔、大阪和东京, 与各城市的实际发展进程相一致。这表明地温偏离恒定地温梯度的最大深度可以作为描述该地区城市化进程的一个重要依据。温度作为一种低成本、无污染的示踪技术可用于城市化的相关研究中, 运用温度示踪技术对广州城市化进程进行估算的结果与运用遥感等手段得到的城市化阶段结果较为相符。

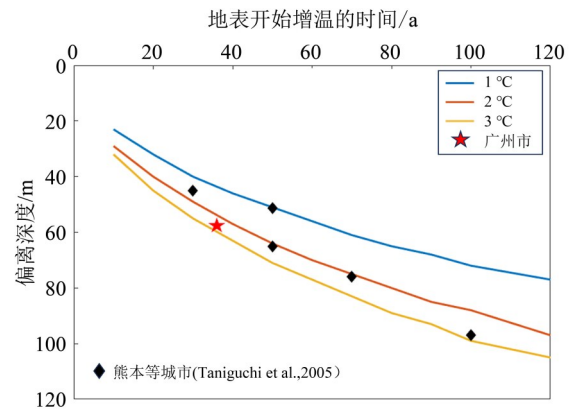


图8 城市化引起地表开始变暖所经过的时间与偏离恒定地温梯度的深度之间的关系

Fig. 8 The relationships between elapsed time from the start of surface warming due to urbanization and the depth of deviation from the constant thermal gradient

4 结论

本文通过对广州地区16个钻孔的温-深曲线进行拟合, 得到地温偏离恒定梯度的深度, 并通过一维非稳定流水-热运移方程解析解进行验证, 得到以下结论:

1) 1958—2022年间, 广州气温呈上升趋势, 年平均气温增温速率为0.033 °C/a, 高于全国均值, 城市热岛效应也呈现出逐年增强的趋势。从城市开始增温时间来看, 广州于20世纪80年代中后期开始增温, 增温趋势与全国基本同步。

2) 对 16 个钻孔的实测地温数据作平均, 估计得到广州地温梯度值为 $0.036\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{m}$ 。对每个钻孔的拟合得到地表温度变化对地下温度影响的平均深度为 54.8 m , 与通过解析解得到的理论位置 (57.6 m) 基本一致。

3) 通过对地表变暖开始的时间的分析表明, 当城市化导致的地表变暖开始的时间越长, 地下温度与恒定地温梯度发生偏离的深度越深。

4) 通过推算广州地表变暖的时间、变暖的幅度以及地温偏离恒定梯度的深度, 得以揭示广州城市化进程大于曼谷与熊本, 但低于首尔、大阪和东京。

致谢: 广东省地质环境监测总站为本文数据采集提供了大力帮助; 研究生杨晨晨曾参与部分野外工作, 在此一并致谢!

参考文献:

- 丁一汇, 任国玉, 石广玉, 等, 2006. 气候变化国家评估报告 (I): 中国气候变化的历史和未来趋势[J]. 气候变化研究进展, 2(1): 3-8+50.
- 董林垚, 喻志强, 徐金鑫, 2018. 地温示踪地表暖化过程中的气候变化和城市热岛效应[J]. 热带地理, 38(2): 236-243.
- 樊亚鹏, 徐涵秋, 李乐, 等, 2014. 广州市城市扩展及其城市热岛效应分析[J]. 遥感信息, 29(1): 23-29.
- 封静, 潘安定, 2011. 广州气温变化特征及其与城市化进程的关系[J]. 广州大学学报(自然科学版), 10(6): 89-94.
- 李济琛, 陈明珠, 汤强, 等, 2021. 南京市浅层地温场研究—基于分布式光纤测温技术[J]. 中国地质, 48(3): 939-947.
- 刘凯, 聂格格, 张森, 2020. 中国 1951—2018 年气温和降水的时空演变特征研究[J]. 地球科学进展, 35(11): 1113-1126.
- 王海波, 黄少鹏, 任永飞, 等, 2014. 西安城市地温与气温变化初步分析[J]. 地质科学, 49(3): 874-887.
- 王惠英, 高权恩, 汤海燕, 等, 2004. 关于广州城市气候生态建设与可持续发展的探讨[J]. 中山大学学报(自然科学版), 43(S1): 237-240.
- 吴艳标, 1986. 广州城区热岛特征及其对空气污染的影响[J]. 热带气象, 2(3): 242-250.
- 杨士弘, 张茂光, 曾荣青, 1984. 广州城市热岛分析[J]. 华南师范大学学报(自然科学版), 16(2): 113-117.
- 周凯, 叶有华, 彭少麟, 等, 2008. 广州市城市热岛时间变化特征及与大气总悬浮颗粒物关系的研究[J]. 生态环境, 17(5): 1861-1867.
- ANDERSON M P, 2005. Heat as a ground water tracer[J]. Ground Water, 43(6): 951-968.
- BIRCH A F, 1948. The effects of Pleistocene climatic variations upon geothermal gradients[J]. Am J Sci, 246(12): 729-760.
- FERGUSON G, WOODBURY A D, 2004. Subsurface heat flow in an urban environment[J]. J Geophys Res, 109(B2): B02402.
- HARRIS R N, CHAPMAN D S, 1997. Borehole temperatures and a baseline for 20th-century global warming estimates [J]. Science, 275(5306): 1618-1621.
- HUANG S, POLLACK H N, SHEN P Y, 2000. Temperature trends over the past five centuries reconstructed from borehole temperatures[J]. Nature, 403(6771): 756-758.
- KALNAY E, CAI M, 2003. Impact of urbanization and land-use change on climate[J]. Nature, 423: 528-531.
- LIU B, XU M, HENDERSON M, et al, 2004. Taking China's temperature: Daily range, warming trends, and regional variations, 1955-2000[J]. J Clim, 17(22): 4453-4462.
- PARKER D E, 2006. A demonstration that large-scale warming is not urban[J]. J Clim, 19(12): 2882-2895.
- ROSENZWEIG C, KAROLY D, VICARELLI M, et al, 2008. Attributing physical and biological impacts to anthropogenic climate change[J]. Nature, 453(7193): 353-357.
- SCHMIDT W L, GOSNOLD W D, ENZ J W, 2001. A decade of air-ground temperature exchange from Fargo, North Dakota[J]. Glob Planet Change, 29(3/4): 311-325.
- SILLIMAN S E, BOOTH D F, 1993. Analysis of time-series measurements of sediment temperature for identification of Gaining vs. losing portions of Juday Creek, Indiana[J]. J Hydrol, 146: 131-148.
- TANIGUCHI M, SHIMADA J, TANAKA T, et al, 1999. Disturbances of temperature-depth profiles due to surface climate change and subsurface water flow: 1. An effect of linear increase in surface temperature caused by global warming and urbanization in the Tokyo Metropolitan Area, Japan[J]. Water Resour Res, 35(5): 1507-1517.
- TANIGUCHI M, UEMURA T, JAGO-ON K, 2007. Combined effects of urbanization and global warming on subsurface temperature in four Asian cities[J]. Vadose Zone J, 6(3): 591-596.
- TANIGUCHI M, UEMURA T, 2005. Effects of urbanization and groundwater flow on the subsurface temperature in Osaka, Japan[J]. Phys Earth Planet Inter, 152(4): 305-313.
- TAYLOR C A, STEFAN H G, 2009. Shallow groundwater temperature response to climate change and urbanization [J]. J Hydrol, 375(3): 601-612.