

浅层地温能开发利用实际节能评价 —以莒县为例

李 翠*, 房玉涛, 柳晓松[#]

山东省煤田地质局第一勘探队, 山东 青岛

收稿日期: 2025年9月19日; 录用日期: 2025年10月12日; 发布日期: 2025年10月19日

摘要

本文旨在对浅层地温能的开发利用进行实际节能评价。通过对莒县的地质条件、浅层地温能资源分布、开发利用现状的分析, 结合实际工程案例, 采用多种评价方法, 对浅层地温能开发利用的节能效果进行了综合评估。研究结果表明, 莒县浅层地温能开发利用具有显著的节能效果, 为当地可持续发展提供了重要支撑。

关键词

莒县, 浅层地温能, 开发利用, 节能评价

Shallow Geothermal Energy Development and Utilization Actual Energy Saving Evaluation

—Taking Juxian as an Example

Cui Li*, Yutao Fang, Xiaosong Liu[#]

The First Exploration of Shandong Provincial Coalfield Geological Bureau, Qingdao Shandong

Received: September 19, 2025; accepted: October 12, 2025; published: October 19, 2025

Abstract

This paper aims to conduct actual energy-saving evaluation of the development and utilization of

*第一作者。

[#]通讯作者。

shallow geothermal energy. By analyzing the geological conditions, the distribution of shallow geothermal energy resources, and the status of development and utilization in Juxian County, and combining with actual engineering cases, various evaluation methods are used to comprehensively assess the energy-saving effects of geothermal energy development and utilization. The research results show that the development and utilization of shallow geothermal energy in Juxian County have significant energy-saving effects, and important support for local sustainable development.

Keywords

Juxian County, Shallow Geothermal Energy, Development and Utilization, Energy-Saving Evaluation

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

随着能源需求的不断增长和环境保护意识的提高，浅层地温能作为一种清洁、可再生的能源资源，受到了越来越多的关注。浅层地温能，作为一种蕴藏在地球浅表层、温度相对稳定的自然资源，因其储量丰富、分布广泛、利用便捷而备受关注。莒县，地处山东省东南部，具有适宜的浅层地温条件，探索其浅层地温能的开发利用对于推动区域能源结构转型、实现节能减排具有重要意义。

2. 研究背景

2.1. 浅层地温能概述

浅层地温能是指蕴藏在地表以下一定深度(通常为 200 米以内)的岩土体、地下水和地表水中[1]，温度相对稳定且易于经济开发的低品位热能。其能量主要来源于太阳辐射、地球内部热量以及地表大气之间的热交换。

2.2. 莒县地质与气候条件

莒县位于鲁东南丘陵地区，地势北高南低，地貌类型以丘陵、平原为主。境内地层主要有太古界、元古界、古生界、中生界和新生界地层，地质构造复杂。浅层地温能主要赋存于第四系松散层和基岩风化带中。

莒县地处温带季风气候区，四季分明，地下水资源丰富，且地质构造稳定，有利于浅层地温能的富集与采集。这些自然条件为莒县浅层地温能的开发利用提供了良好的基础。

3. 研究目的

本文旨在通过深入分析莒县浅层地温能开发利用的现状，科学评估其节能效果，明确其对区域能源结构优化和环境保护的贡献，为莒县乃至全省浅层地温能的科学开发与合理利用提供理论依据和实践指导。

4. 评价方法

4.1. 浅层地温能热容量计算评价

根据莒县的实际情况，本次浅层地温能热容量评价按《浅层地温能勘查评价规范》(DZ/T0225-2009)

标准，采用体积法计算。体积法计算浅层地温能热容量，应分别计算包气带和饱水带中单位温差储藏的热量，然后合并计算评价范围内地质体的储热量[1]。

1) 计算分区

本次工作区全部被第四系沂河组覆盖，一级分区全部划为第四系覆盖区(I)；按地下水位埋深分为3个计算亚区：<3 m、3~6 m、>6 m，本次工作区地层岩性主要为白垩系泥岩、砂岩及砂砾岩层等沉积岩，因此对3个亚区不按地层岩性细分三级计算小区，见图1。

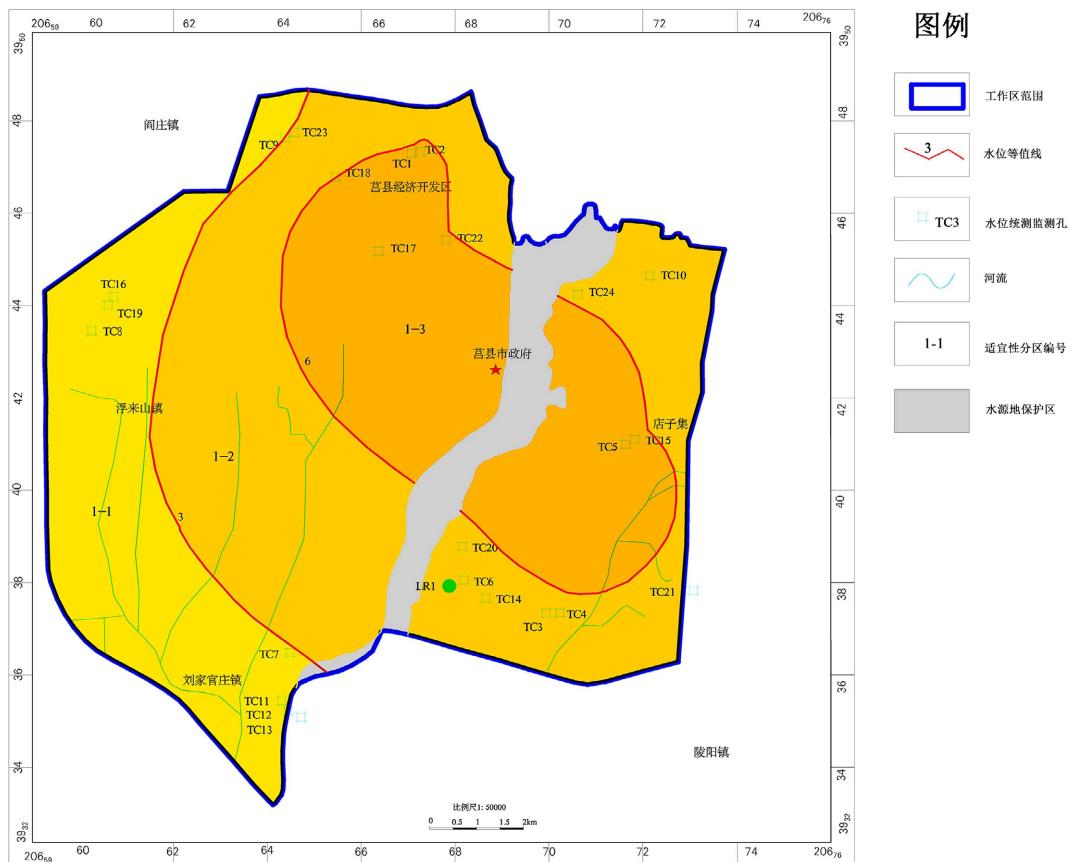


Figure 1. Thermal capacity calculation zones in the workplace

图 1. 工作区热容量计算分区图

2) 参数确定

本次计算评价主要参数包括计算区面积、包气带和饱水带厚度、热物理参数、水和空气的参数[2]。

3) 热容量计算结果

利用热容量计算公式对工作区热容量进行了计算，工作区 120 m 浅层地温能总容量为 5.11×10^{14} PkJ/°C，约合 1745.11 万吨标准煤；200 m 浅层地温能总容量为 8.32×10^{14} PkJ/°C，约合 2841.36 万吨标准煤。

4.2. 浅层地温能热功率计算

依据地埋管地源热泵适宜性区划和在对比分析了原位热响应测试成果与室内热物性测试结果基础上，在适宜区和较适宜区内，按照单孔换热功率大小，继续细分为6个子区来进行计算评价[2]。

在层状均匀的土壤或岩石中，稳定传热条件下 U 形地埋管的单孔换热功率按下式计算：

$$D = \frac{2\pi L |t_1 - t_4|}{\frac{1}{\lambda_1} \ln \frac{r_2}{r_1} + \frac{1}{\lambda_2} \ln \frac{r_3}{r_2} + \frac{1}{\lambda_3} \ln \frac{r_4}{r_3}}$$

地埋管换热功率的计算参数选取如下：

- 1) PE 地埋管的热导率(λ_{R1R})：根据实际管材的性质，取值为 $0.42 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{C})$ 。
- 2) 回填材料的热导率(λ_{R2R})：回填料采用中粗石英砂，热导率(λ_{R2R})利用经验参数确定：饱水带 $2.5 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{C})$ ，包气带 $0.586 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{C})$ 。
- 3) 岩土体的平均热导率：热响应试验综合导热系数测试的为石英砂与岩土体的综合热导率，而中粗砂的热导率较大，因此综合导热系数要大于岩土样测试的单一岩土体的热导率。
- 鉴于单孔换热功率是评价地区浅层地温能潜力的最重要影响因素，因此本次换热功率计算参数采用更为保守的岩土样测试单孔厚度加权平均热导率。
- 4) 地埋管换热器长度(L)：计算深度 120 m ，除去表层易受大气影响的 3 m 深度，L 取值 117 m 。
- 5) 地埋管束的等效半径(r_{R1R})：双 U 管为管内径的 2 倍，本次工作均采用外径为 32 mm ，管壁厚 3 mm 的 PE 管。因此，双 U 管的等效半径为 0.026 m 。
- 6) 地埋管束的等效外径(r_{R2R})：等效外径为等效半径 r_{R1R} 加管材壁厚，等效外半径为 0.029 m 。
- 7) 换热孔平均半径(r_{R3R})：按照实际的热响应试验钻孔取值，莒县地区钻孔半径取 0.075 m 。
- 8) 换热温度影响半径(r_{R4R})：换热温度影响半径采用 2.5 m 。
- 9) 地埋管内流体的平均温度(t_{R1R})：夏季换热器进口温度取 30°C ，出口温度 26°C 平均温度 28°C ；冬季换热器进口温度取 4°C ，出口温度取 8°C ，平均温度 6°C 。
- 10) 温度影响半径之外岩土体的温度(t_{R4R})：根据热响应试验取实测值，依据垂向测温数据，按地温梯度计算 120 m 内平均地温。

将上述各参数代入公式，可计算出地埋管地源热泵适宜和较适宜区冬季和夏季的可利用换热功率，关键参数列表，见表 1。

工作区地埋管换热适宜性中等区面积为 139.89 km^2 。

有土地利用系数时，工作区可利用总功率为 $4.15 \times 10^{P^6} \text{ kW}$ ，其中夏季可利用功率为 $1.96 \times 10^{P^6} \text{ kW}$ ，冬季可利用功率为 $2.19 \times 10^{P^6} \text{ kW}$ ；

不考虑土地利用系数时，工作区可利用总功率为 $3.77 \times 10^{P^7} \text{ kW}$ ，其中夏季可利用功率为 $1.78 \times 10^{P^7} \text{ kW}$ ，冬季可利用功率为 $1.99 \times 10^{P^7} \text{ kW}$ 。

Table 1. List of key parameters

表 1. 关键参数列表

序号	参数名称	参数值	来源	备注
1	岩土体的平均热导率	综合导热系数大于单一岩土体的热导率	实验测试	热响应试验综合导热系数测试
2	PE 地埋管的热导率(λ_{R1R})	$0.42 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{C})$	经验估算	根据实际管材性质取值
3	回填材料的热导率(λ_{R2R})	饱水带 $2.5 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{C})$ ，包气带 $0.586 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{C})$	经验估算	回填料采用中粗石英砂
4	地埋管换热器长度(L)	117 m	行业标准	计算深度 120 m ，除去表层易受大气影响的 3 m 深度
5	地埋管束的等效半径(r_{R1R})	0.026 m	行业标准	双 U 管为管内径的 2 倍

续表

6	地埋管束的等效外径(rR2R)	0.029 m	行业标准	等效外径为等效半径加管材壁厚
7	换热孔平均半径(rR3R)	0.075 m	实验测试	按实际的热响应试验钻孔取值
8	换热温度影响半径(rR4R)	2.5 m	经验估算	
9	地埋管内流体的平均温度(tR1R)	夏季 28°C, 冬季 6°C	经验估算	夏季进口 30°C, 出口 26°C; 冬季进口 4°C, 出口 8°C
10	温度影响半径之外岩土体的温度(tR4R)	按地温梯度计算 120 m 内平均地温	实验测试	根据热响应试验取实测值
11	土地利用系数	0.11	参考文献	结合指标法和层次分析法对比划分工作区

4.3. 工作区浅层地温能可利用换热总量计算

工作区从地埋管及地下水地源热泵系统对莒县进行换热功率计算, 但实际工程开发利用时, 在地埋管、地下水地源热泵利用重合区域, 一般只利用一种地源热泵形式。最终的总换热功率不是地下水及地埋管的简单相加, 而是按照地埋管 2/3, 地下水 1/3 的比例基础上进行综合计算评价[3]。

按土地利用情况进行计算评价, 即考虑土地利用率和土地利用率为 100%这两种情况。结合指标法和层次分析法对比划分工作区除了沭河水源地保护区和生态红线范围内的其它区域均为地下水源热泵适宜性好区和中等区及地埋管地源热泵适宜性中等区。二者重合面积 13.55 km², 因此总换热功率计算面积为 139.89 km²。

5. 浅层地温能潜力评价

浅层地温能资源潜力评价是在评价适宜性分区的基础上, 采用单位面积可利用量的供暖和制冷面积表示。

5.1. 冷热负荷的确定

根据莒县供暖现状资料调查(莒县城市供热专项规划(2012~2030))和城市总体规划及山东省工程建设标准《公共建筑节能设计标准》DBJ14-036-2006, 结合山东省浅层地温能调查评价技术要求, 确定莒县冬季供暖负荷为 45 W/m²; 夏季制冷负荷为 56 W/m², 利用上节计算得到地源热泵适宜性好区、适宜性中等区冬季和夏季的换热功率, 进一步计算出冬季可供暖、夏季可制冷面积及单位的供暖和制冷面积[4]。

5.2. 浅层地温能资源潜力评价

利用计算得到地埋管地源热泵适宜性好区、适宜性中等区冬季和夏季的换热功率, 进一步计算出冬季可供暖、夏季可制冷总潜力及单位面积潜力, 见图 2。

总潜力: 工作区冬季可供暖总面积 4.87×10^7 m², 夏季可制冷总面积 3.50×10^7 m²; 全县域冬季可供暖总面积 4.60×10^8 m², 夏季可制冷总面积 4.44×10^8 m²。

单位潜力: 单位潜力计算就是冬季可供暖总面积或夏季可制冷总面积除以相应的适宜区面积来获得。

工作区冬季可供暖面积 31.31×104 m²/km², 夏季可制冷面积 17.51×10^4 m²/km²; 全县域冬季可供暖面积 28.17×10^4 m²/km², 夏季可制冷面积 21.18×10^4 m²/km²。

工作区潜力评价结果: 地埋管热泵系统单位面积可供暖面积: $>30 \times 104$ m²/km² 的面积为 139.89 km², 占工作区总面积 93.26%。

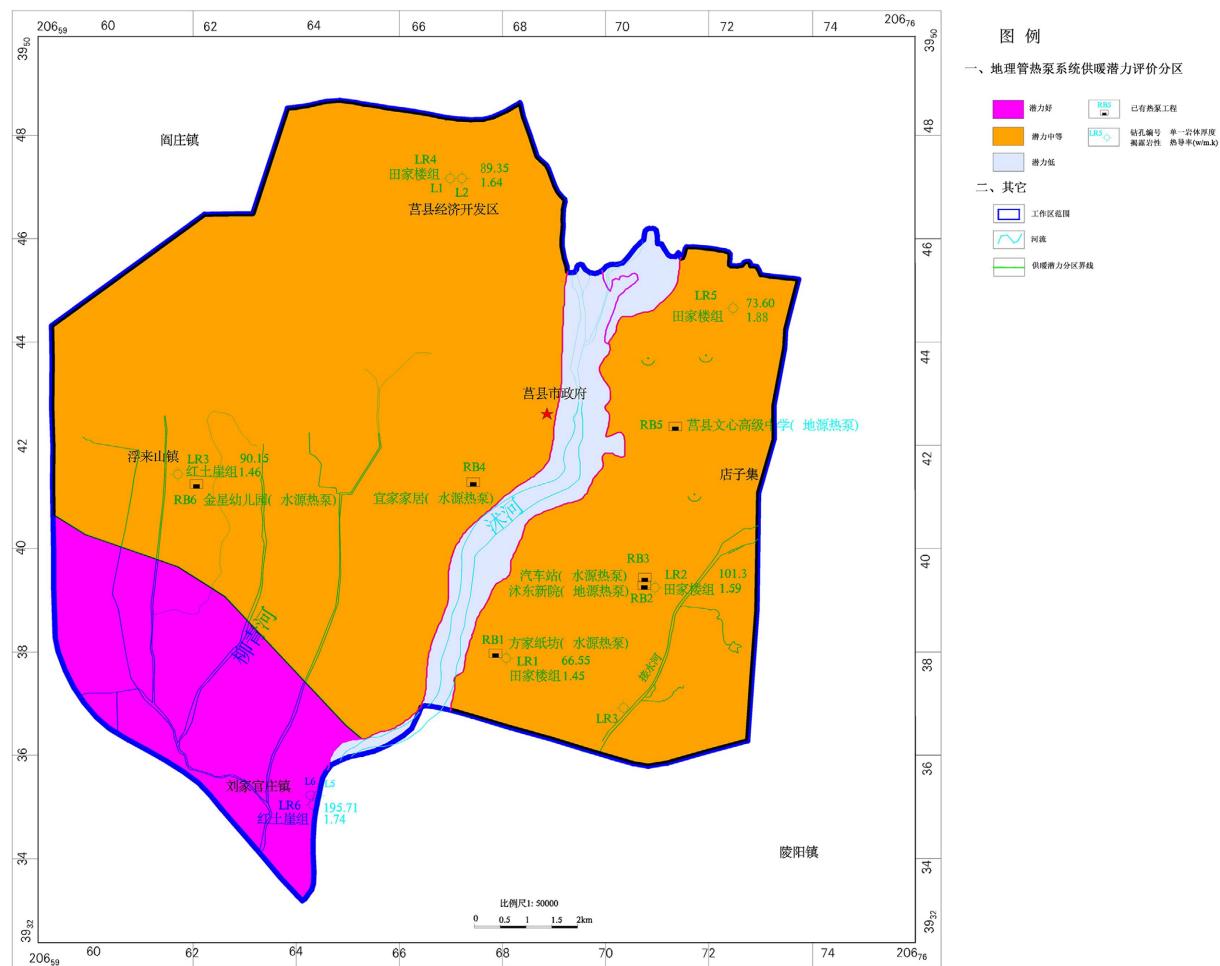


Figure 2. Evaluation map of the heating potential of the ground-source heat pump system in the work area
图 2. 工作区地理管热泵系统供暖潜力评价图

工作区冬季取暖时间为当年 11 月 15 日至翌年 3 月 15 日，采暖时间约 120 天，根据试验数据，按单孔冬季可取热量(制冷测试)量为 37.3 W/m ，每孔每米 120 天可取热为 4476 W 。夏季的制冷时间一般为每年的 6 月 15 日至 9 月 15 日，制冷时间约 90 天，根据试验数据，按单孔夏季可取热量(加热 6 kW 测试)为 47.24 W/m ，每孔每米 90 天可取热为 4251.6 W 。

从全年来看，在一年内既制冷又供暖的情况下，一个孔一年内取热时间长，单孔提取的热量要大于向孔内排放的热量，提取和排放的热量不完全均衡。但从 3 月 15 日停暖后到 6 月 15 日浅层地温处于恢复期，恢复期为 90 天左右，而从 9 月 25 日停止制冷后到 11 月 15 日浅层地温的恢复期为 50 天，根据地温监测数据可知，虽取热后的恢复期大于排热后的恢复期，地温可以基本恢复至热泵运行前初始温度，故认为经过 1 个采暖和制冷期地源热泵工程运行后，热量基本可以恢复到平衡状态。

5.3. 实际运行换热功率与理论计算值的对比分析

从莒县地质条件来看，莒县具有典型的浅层地温能赋存特征，其地质结构和气候条件在山东省乃至全国范围内都具有一定的代表性。本项目以莒县人民医院沐东新院地源热泵系统为例来分析评价。

1) 实际运行换热功率

以莒县人民医院沐东新院地源热泵系统为例，供暖面积 $166,970 \text{ m}^2$ 。夏季地源侧供回水温度为 $33/30^\circ\text{C}$ ，

制冷量 2768 Kw, 冬季地源侧供回水温度为 15.5/10.5°C, 制热量 3044 Kw。通过埋在地下 100 米深的 PE 管组, 热泵机组向地下提取冷量和热量, 同时实现蓄热和蓄冷, 以达到热平衡要求。

2) 区域理论计算值

根据工作区的热容量计算结果, 120 米深度范围内的浅层地温能总容量为 $5.11 \times 10^{14} \text{P kJ}/\text{C}$, 约合 1745.11 万吨标准煤; 200 米深度范围内的总容量为 $8.32 \times 10^{14} \text{P kJ}/\text{C}$, 约合 2841.36 万吨标准煤。此外, 工作区地理管换热适宜性中等区面积为 139.89 平方公里, 可利用总功率为 $4.15 \times 10^6 \text{P kW}$ (考虑土地利用系数时)或 $43.77 \times 10^6 \text{P kW}$ (不考虑土地利用系数时)。

3) 差异原因分析

土地利用限制: 理论计算通常假设土地利用率为 100%, 而实际工程中受土地用途、生态保护等因素限制, 土地利用率仅为 0.11 左右;

热响应效率: 理论模型基于理想条件下的热物性参数, 而实际运行中受土壤湿度、地下水流动等动态因素影响, 热响应效率可能低于理论值;

设备性能: 实际工程中使用的地源热泵设备可能存在性能衰减或设计冗余, 导致实际换热功率低于理论值。

4) 利用实测数据对区域评价模型的初步验证

实测数据的应用: 热响应试验测试, 场地初始温度 16°C, 导热系数 $1.79 \text{W}/(\text{m}\cdot\text{C})$, 容积比热容 $0.57 \times 10^3 \text{P J}/(\text{m}^3\cdot\text{C})$, 冬季双 U 型埋管按 42~46 W/m 计, 夏季双 U 型埋管按 54~60 W/m 计。这些实测数据为区域评价模型提供了关键输入参数。

热导率修正: 理论模型中的岩土体平均热导率通常采用单一岩土体的热导率, 而实测数据显示综合导热系数大于单一岩土体的热导率。因此, 在模型中应采用更保守的加权平均热导率进行计算;

换热功率调整: 根据实际运行数据, 单孔换热功率在冬季为 37.3 W/m, 夏季为 47.24 W/m。这些数据可用于校正理论模型中的单位面积换热功率, 从而提高预测精度。

设计钻孔 1932 个, 孔距 4~6 m, 孔深 100 m。每 6 个钻孔组成一个水平环路, 通过钢塑转换接头与分集水器相连接。竖直地埋管采用高密度聚乙烯 PE100, 管径为 De25 的双 U 型管。双 U 管与孔壁间回填砂或钻出的砂浆直至地面。

验证结果: 通过将实测数据代入区域评价模型, 发现经过校正后的模型能够更好地反映实际换热功率。例如, 工作区冬季可供暖总面积为 $4.87 \times 10^7 \text{ m}^2$, 夏季可制冷总面积为 $3.50 \times 10^7 \text{ m}^2$, 与实际工程数据基本吻合。

5.4. 经济环境效益评价

根据《综合能耗计算通则》(CB/T2589-2008)中原煤与标煤的折算系数 0.7143, 考虑燃煤与换热效率等因素, 选取燃煤锅炉热效率转换系数 0.6(参考《关于地热利用与节煤减排的计算方法》), 计算出节省的标煤量[5]。

以节煤量(GRJR)为基数, 参照《地热资源地质勘查规范》(GB/T11615-2010), 计算浅层地温能开发利用减排量带来的社会效益。

由计算可得莒县人民医院沐东新院地埋管地源热泵系统浅层地温能开发利用的总能量为 189560.4 GJ, 相当节约煤标量 1.08 万吨; 节煤量 3777.75 吨; 相当热资源价值 188.89 万元。

以节煤量为基数, 计算得到浅层地温能开发利用排量带来的环境效益见表 2。

工作区经济环境效益评价: 根据《采暖通风与空气调节设计规范》等相关规范, 莒县地区夏季制冷季时长 90 天, 每天 10 小时; 冬季供暖季时长 120 天, 每天 12 小时。

Table 2. Environmental benefits**表 2. 环境效益表**

项 目	二氧化硫减排 量/kg	氮氧化物减排 量/kg	二氧化碳减排 量/kg	悬浮质粉尘减排 量/kg	灰渣减排量 /kg	减排后节省的环境 治理费/元
值	64221.73	22666.49	9013708.3	30221.989	377774.9	1065702.9

考虑土地利用系数时，可以求得工作区的浅层地温能年可获资源量为 $1.61 \times 10^7 \text{ GJ/a}$ ，年节约标煤量为 91.9 万吨，换算成原煤量为 321.59 万吨。相当热源价值 16.08 亿元，年减排二氧化硫 5.47 万吨，减排氮氧化物 1.93 万吨，减排二氧化碳 767.24 万吨，减排悬浮质粉尘 2.57 万吨，减排灰渣量 32.16 万吨，节约环境治理费 90.71 亿元。

不考虑土地利用系数时，可以求得工作区的浅层地温能年可获资源量为 $14.66 \times 10^7 \text{ GJ/a}$ ，年节约标煤量为 834.61 万吨，换算成原煤量为 0.29 亿吨。相当热源价值 146.06 亿元，年减排二氧化硫 49.66 万吨，减排氮氧化物 17.53 万吨，减排二氧化碳 6969.85 万吨，减排悬浮质粉尘 23.37 万吨，减排灰渣量 292.11 万吨，节约环境治理费 824.06 亿元。

6. 研究局限性分析

6.1. 模型的简化假设

本研究在计算浅层地温能热容量和热功率时，采用了多种简化假设。例如，在热容量计算中，假设地层是均质的。然而，实际地质条件往往复杂多变，地层的非均质性可能对热传导和热储存产生显著影响。这种简化假设可能导致计算结果与实际情况存在偏差。

6.2. 参数选取的不确定性

参数选取的不确定性也是本研究的一个重要局限性。例如，岩土体的平均热导率、PE 地埋管的热导率以及回填材料的热导率等关键参数，部分基于经验估算或行业标准。这些参数的选取可能存在一定的主观性和误差，从而影响最终的计算结果。此外，土地利用系数的选取也具有较大的不确定性，这直接影响到可利用总功率的计算。

6.3. 长期运行下地下热平衡的潜在风险

长期运行下地下热平衡的潜在风险是另一个需要关注的问题。虽然研究表明经过一个采暖和制冷期后，地源热泵工程运行后的热量基本可以恢复到平衡状态，但这一结论主要基于短期监测数据。长期运行过程中，地下热平衡可能会受到多种因素的影响，如地下水流动、土壤湿度变化等。这些动态因素可能导致地下热环境的变化，进而影响系统的稳定性和效率。

7. 结论

本文通过对莒县浅层地温能开发利用实际节能评价研究，得出以下结论：

- 1) 莒县浅层地温能资源丰富，具备良好的开发条件和技术可行性。
- 2) 浅层地温能的开发利用在节能减排和环境保护方面具有显著效果，能够大幅降低能源消耗和污染物排放。
- 3) 地源热泵系统作为主要的开发利用方式，具有高效、环保、经济的优势，适合在莒县及类似地区推广应用。
- 4) 本研究在模型简化假设、参数选取的不确定性以及长期运行下地下热平衡的潜在风险等方面存在

一定的局限性。未来的研究应进一步探索这些方面，以提升评价模型的准确性和可靠性。

基金项目

莒县浅层地温能调查评价报告(鲁国资字[2018] 288 号)。

参考文献

- [1] 闫福贵. 呼和浩特市浅层地温能开发利用适宜性评价研究[D]: [博士学位论文]. 北京: 中国地质大学, 2013.
- [2] 宋帅良. 菏泽市浅层地温能开发利用适宜性研究[D]: [硕士学位论文]. 北京: 中国地质大学, 2018.
- [3] 杨传伟, 全路, 孔铭, 等. 兖州区浅层地温能开发利用适宜性分区及资源[J]. 地下水, 2023, 45(1): 85-89+161.
- [4] 王婉丽, 王贵玲, 朱喜, 等. 中国省会城市浅层地热能开发利用及潜力评价[J]. 中国地质, 2017, 44(6): 1062-1073.
- [5] 邓斌, 刘海风, 王沙沙, 等. 河南城市浅层地温能潜力及其环境经济效益分析[J]. 地质学刊, 2017, 41(1): 165-170.